

Contribution à l'étude de l'amplification des courants continus

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 25 Avril 1934

DEVANT LA FACULTÉ DE PHARMACIE DE NANCY

pour obtenir le Grade

de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ
(Mention Pharmacie)

PAR

Jean DIVOUX

Pharmacien

Licencié ès-sciences

Ancien préparateur de Physique

Chargé de travaux à la Faculté

Lauréat de l'Université

Né le 29 Janvier 1909 à Nancy

Examineurs ..	{	MM. P. SEYOT	Président.
		Ch. PRÉVOST	Juges.
		P. DONZELOT	

NANCY /
SOCIÉTÉ D'IMPRESSIONS TYPOGRAPHIQUES
1934



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Contribution à l'étude de l'amplification des courants continus

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 25 Avril 1934

DEVANT LA FACULTÉ DE PHARMACIE DE NANCY

pour obtenir le Grade

de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ
(Mention Pharmacie)

PAR

Jean DIVOUX

Pharmacien

Licencié ès-sciences

Ancien préparateur de Physique

Chargé de travaux à la Faculté

Lauréat de l'Université

Né le 29 Janvier 1909 à Nancy

Examineurs . .	{	MM. P. SEYOT	Président.
		Ch. PRÉVOST	Juges.
		P. DONZELOT	

NANCY
SOCIÉTÉ D'IMPRESSIONS TYPOGRAPHIQUES
1934

UNIVERSITÉ DE NANCY - FACULTÉ DE PHARMACIE

PERSONNEL ENSEIGNANT

DOYEN HONORAIRE :

M. BRUNTZ, O.   I  O.    Recteur de l'Université de Nancy

PROFESSEURS HONORAIRES :

MM. FAVREL,  I 

BRUNTZ, O.   I  O.   

DOYEN :

M. SEYOT,   I   

ASSESSEUR :

M. GILLOT, I  

PROFESSEURS :

MM. GRÉLOT,  I  	Pharmacie galénique.
DOURIS, I   	Toxicologie.
PASTUREAU, O  I  	Pharmacie chimique.
SEYOT,   I   	Histoire naturelle.
LASSEUR, I  	Microbiologie.
GILLOT, I  	Matière médicale.
PRÉVOST, 	Chimie organique.

AGRÉGÉ LIBRE :

M. GIRARDET,  I  Chimie et Toxicologie.

CHARGÉS DE COURS

MM. PRÉVOST, 	Chimie minérale et Minéralogie.
GRÉLOT,  I  	Hydrologie.
PASTUREAU, O  I  	Chimie biologique.
DONZELOT	Physique.
VERNIER, I 	Zoologie.
SIMONNET, I 	Législation et Déontologie.
GILLOT, I  	Pharmacotechnie.
CORDEBARD, I  	Analyse chimique.
SEYOT,   I   	Hygiène.

CHEFS DE TRAVAUX :

MM. VERNIER, I 	Microbiologie et Parasitologie.
MEUNIER	Pharmacie.
CORDEBARD, I  	Chimie et Analyse chimique.
STEIMETZ	Micrographie.
DONZELOT (chargé de travaux)	Physique.
DIVOUX (chargé de travaux)..	Chimie biologique et Toxicologie.

SECRÉTARIAT :

M. E. TRIBOLET, I  Secrétaire.

La Faculté a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui sont présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs, et qu'elle n'entend ni les approuver ni les imputer.



A MES PARENTS

Témoignage de ma profonde affection.

A mon Maître

MONSIEUR LE PROFESSEUR P. DONZELOT

Agrégé des Sciences Physiques

Chargé du cours de Physique à la Faculté de Pharmacie

Respectueux hommage.

AVANT-PROPOS

C'est un bien agréable devoir, agréable d'ailleurs comme les six années que nous avons passées à la Faculté, de pouvoir remercier tous nos Maîtres, pour la bienveillance qu'ils nous ont témoignée au cours de nos études. Nous pensons à chacun d'eux en particulier dans les remerciements que nous adressons à tous collectivement.

Notre pensée va tout d'abord à Monsieur le Professeur Pillot, qui nous fit l'honneur de nous accepter comme préparateur, lorsqu'il était chargé du cours de Physique; nous sommes heureux de lui exprimer notre profonde reconnaissance.

Nous devons à notre Président de thèse et à nos Juges une gratitude toute spéciale: c'est pourquoi nous adressons à Monsieur le Professeur Seyot, Doyen de notre Faculté, qui toujours nous a témoigné la plus paternelle bienveillance, et à Monsieur le Professeur Prévost, qui nous a honoré de son amitié au cours de nos études, nos sincères remerciements.

Si nous pouvons présenter cette thèse devant la Faculté, nous le devons à notre Maître Monsieur le Professeur Donzelot, qui nous proposa ce sujet, nous guida pas à pas et nous conseilla au cours de ce travail. C'est avec regret que nous quitterons son laboratoire, où sous sa direction règne la plus franche cordialité.

Nous disons amicalement merci à nos camarades de laboratoire et plus particulièrement à MM. Mougenot et George pour l'aide qu'ils nous ont sans cesse apportée.

Nous ne voulons pas oublier Monsieur Jacquot, mécanicien de notre Faculté, qui grâce à sa grande habileté, jointe à son expérience, nous fût un collaborateur précieux.

INTRODUCTION

Le sujet de ce travail est l'étude du problème de l'amplification des courants continus. Nous y avons été conduits pour la construction d'un néphélocolorimètre à cellules photoélectriques. La sensibilité et la commodité d'emploi de cet appareil nous ont paru dépendre des qualités de l'amplificateur de sortie. L'étude de cette dernière question a été faite en détail, et ce sont les résultats obtenus que nous allons exposer.

La mesure des faibles courants, inférieurs à 10^{-10} Amp., semble relever des galvanomètres très sensibles. Mais, outre que ces appareils exigent pour leur emploi des conditions mécaniques difficiles à réaliser, leur sensibilité limite est de 10^{-12} Amp. Les électromètres permettent de reculer cette limite, mais aux dépens de la commodité d'emploi. Ils sont, de plus, coûteux et fragiles. Il devenait donc intéressant de chercher une méthode plus pratique pour la mesure des faibles courants. La découverte des lampes à trois électrodes, l'étude de leurs propriétés, ont immédiatement amené les physiciens à les utiliser. Le perfectionnement des techniques industrielles a rendu plus facile la solution du problème, en mettant sur le marché des lampes à plus de trois électrodes adaptées à des fonctions non prévues par les premiers constructeurs. En effet, les lampes à trois électrodes avaient été primitivement réalisées en vue surtout du travail avec des courants de haute fréquence. Or il s'agit ici de courants continus, ou variant assez lentement pour que ni selfs, ni capacités, ne puissent être utilisées comme organes de liaison.

La mesure de tels courants demande, de plus, des montages dont les caractéristiques restent stables pendant un grand intervalle de temps, nécessairement plusieurs heures, utilement plusieurs mois.

PARTIE THÉORIQUE

CHAPITRE PREMIER

DÉFINITIONS

Etant donné qu'il va être fait usage d'un certain nombre de grandeurs, nous allons rappeler leur définition.

Caractéristiques de plaque d'une lampe

Pour ces caractéristiques, habituellement les plus connues, nous ne donnerons que:

α) *La définition de la résistance de plaque*: c'est l'inverse de la pente de la courbe qui donne le courant plaque I_p en ordonnées, en fonction de la tension plaque E_p en abscisses; nous l'appellerons ρ_p et nous poserons:

$$\rho_p = \frac{dE_p}{dI_p}$$

β) *La définition de la pente P*: c'est, au sens algébrique, la pente de la caractéristique obtenue en portant I_p en ordonnées et la tension grille E_g en abscisses. On l'exprime en milliampères par volt. Nous poserons:

$$P = \frac{dI_p}{dE_g}$$

Nous remarquerons ici que la pente peut varier suivant le point d'utilisation de la caractéristique. Dans le cas où l'on utilise une

portion incurvée de cette caractéristique, les équations que nous utiliserons ne seront valables que dans le petit domaine où la tangente peut être pratiquement confondue avec la courbe, à l'approximation près des appareils de mesure utilisés finalement.

Caractéristiques de grille d'une lampe

Dans les amplificateurs que nous allons décrire, les propriétés du circuit grille jouent un rôle essentiel. Ces caractéristiques étant habituellement beaucoup moins utilisées que celles de plaque, nous y insisterons davantage.

La courbe intéressante est celle qui donne le courant grille, c'est-à-dire le courant qui circule entre l'électrode grille et l'électrode filament, en fonction du paramètre habituellement déterminant, qui est le potentiel de grille (fig. 29). Cette courbe permet de définir la résistance apparente φ_g entre ces deux électrodes. De même que pour la résistance de plaque, nous prendrons comme valeur de φ_g , et nous appellerons résistance de grille l'inverse de la pente de la courbe I_g/E_g au point considéré:

$$\varphi_g = \frac{dE_g}{dI_g}$$

Les portions rectilignes de cette courbe étant généralement très peu étendues, c'est la tangente au point moyen de fonctionnement qui donnera cette grandeur. Tout comme pour les caractéristiques de plaque, les équations que nous écrirons ne seront valables que dans le petit intervalle où φ_g reste constant, à l'approximation près des appareils de lecture utilisés finalement.

Le tracé de la courbe I_g/E_g montre en général: a) que le courant grille peut prendre des valeurs soit négatives, soit positives; b) que dans sa partie montante, cette courbe a l'allure d'une exponentielle; c) et surtout, que la résistance φ_g , définie comme précédemment, peut prendre des valeurs soit négatives, soit positives, et qu'elle est extrêmement grande au voisinage du point H à tangente horizontale. Nous reviendrons, dans la seconde partie, sur le tracé et la signification de ces courbes I_g/E_g , et sur les conclusions qu'on en doit tirer pour l'utilisation des amplificateurs.

Équations de la lampe

L'équation de la lampe que nous utiliserons est une relation entre le courant plaque I_p , la tension plaque effective E_p et la tension grille effective E_g . Nous emploierons la forme linéaire:

$$\varphi_p I_p = E_p + K E_g - a$$

a est une constante, en général positive.

K , coefficient d'amplification, est lié à la pente et à la résistance interne φ_p par la relation:

$$K = \frac{K}{\varphi_p}$$

Nous signalerons que K est égal au rapport de la capacité filament grille C_g à la capacité filament plaque C_p

$$K = \frac{C_g}{C_p}$$

CHAPITRE II

PRINCIPE DE L'AMPLIFICATION

Le but poursuivi étant l'amplification de faibles intensités, et la lampe à trois électrodes ne réagissant qu'à des variations de potentiel grille, il faut, à toute variation di d'intensité, faire correspondre une variation dE_g de tension grille. Pour cela, on fera passer le faible courant à amplifier dans une très grande résistance R_g , placée entre grille et filament d'une triode (fig. 1). Une variation di du courant amènera une variation du potentiel grille:

$$dE_g = R_g di$$

d'où une variation dI_p du courant plaque.

La valeur du montage est exprimée par le rapport

$$\alpha = \frac{dI_p}{di}$$

que nous appellerons le pouvoir amplificateur.

Nous remarquerons, et nous insisterons sur ce point, que nous ne nous déplacerons que très peu sur les caractéristiques dans la très grande majorité des cas; nous n'aurons donc besoin que de relations entre de petits accroissements des variables. Ceci nous permet d'utiliser, sous leur forme différentielle, les équations habituelles. Les calculs en deviennent plus simples, surtout si l'on fait encore les hypothèses que *physiquement* on est autorisé à faire.

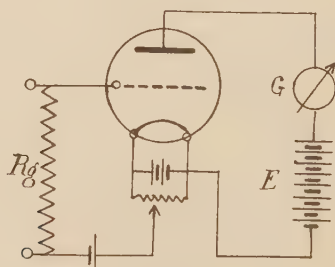


Fig. 1

Dans le cas théorique simple de la figure 1, où nous négligeons les résistances du galvanomètre et des connexions, nous pouvons écrire:

$$\varphi_p dI_p = dE_p + K dE_g \quad (1)$$

Et l'on aura

$$\alpha = \frac{dI_p}{di} = \frac{dI_p}{dE_g} \cdot \frac{dE_g}{di} = P \cdot R_g \quad (2)$$

car le rapport dI_p/dE_g est égal à la pente de la lampe, et dE_g est égal à $R_g \cdot di$.

Le pouvoir amplificateur sera donc d'autant plus grand:

1° Que la pente P de la lampe utilisée sera plus grande;

2° Que la résistance R_g interposée dans le circuit grille aura une valeur plus élevée.

Mais ce résultat n'est qu'une première approximation car:

a) Il existe des résistances dans le circuit plaque;

La relation qui lie la variation du potentiel plaque à la résistance R_p placée dans le circuit plaque et à dI_p est:

$$dE_p = R_p \cdot dI_p \quad (3)$$

b) Le faible courant à mesurer d_i débite, non seulement dans la résistance R_g , mais aussi dans la résistance r_g qui est en parallèle avec R_g ;

La relation qui lie dE_g et d_i sera alors:

$$dE_g = \frac{d_i}{\frac{1}{R_g} + \frac{1}{r_g}} \quad (4)$$

c) Il faut faire intervenir la sensibilité de l'appareil de mesure.

Soit s cette sensibilité. Nous la définirons d'après l'appareil employé; par exemple, pour un galvanomètre, ce sera le courant qui donne une déviation de 1 mm. sur une échelle placée à 1 mètre. Le courant dI_p aura comme mesure le quotient de la déviation totale δ par s :

$$dI_p = \frac{\delta}{s}$$

La sensibilité totale et réelle du montage sera le quotient de la déviation lue δ par le d_i qui la provoque. On aura:

$$S_{int.} = \frac{\delta}{d_i} = \frac{s \cdot dI_p}{d_i} = s \cdot \alpha$$

α étant le pouvoir amplificateur

Nous exprimerons le pouvoir amplificateur comme précédemment :

$$\alpha = \frac{dI_p}{di} = \frac{dI_p}{dE_g} \cdot \frac{dE_g}{di}$$

Or les équations (1) et (3) donnent immédiatement :

$$\frac{dI_p}{dE_g} = \frac{\frac{K}{\rho_p}}{1 + \frac{R_p}{\rho_p}} = \frac{P}{1 + \frac{R_p}{\rho_p}}$$

L'équation (4) :

$$\frac{dE_g}{di} = \frac{1}{\frac{1}{R_g} + \frac{1}{\rho_g}} = \frac{R_g}{1 + \frac{R_g}{\rho_g}}$$

D'où

$$S_{int.} = P \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_p}{\rho_p}} \cdot \frac{R_g}{1 + \frac{R_g}{\rho_g}} \cdot s \quad (5)$$

P étant la pente effective de la lampe dans les conditions d'emploi.

On passe de la sensibilité en intensité à la sensibilité en volts en multipliant par le facteur :

$$\frac{R_g}{1 + \frac{R_g}{\rho_g}}$$

et l'on a :

$$S_{volts.} = P \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_p}{\rho_p}} \cdot s \quad (6)$$

Mais c'est surtout la sensibilité en intensité qui nous intéresse.

La lampe étant choisie, ainsi que l'appareil de mesure, on voit que cette sensibilité dépendra du choix de R_p et de R_g . La résistance R_p sera, par exemple, celle d'un appareil de mesure G , ou celle d'une résistance de liaison. Il y a intérêt à ce que la résistance R_p soit petite devant r_p . S'il s'agit d'un appareil de mesure, on le prendra aussi peu résistant que possible; s'il s'agit d'un couplage par résistance, on doit tenir compte du fait que la variation de tension grille dE_{g2} produite sur la grille de la lampe suivante et qui est égale à: $R_p \cdot dI_p$ doit être la plus grande possible; on choisira alors

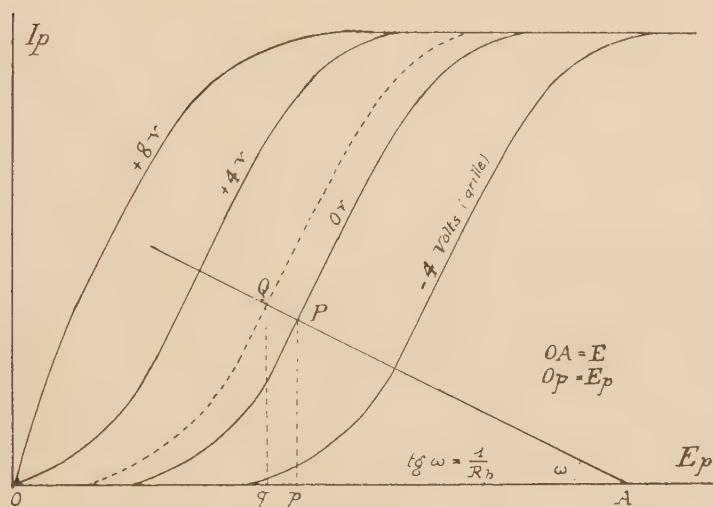


Fig. 2

R_p tel que la droite qui figure R_p dans la représentation en coordonnées I_p/E_p , coupe les caractéristiques de travail (choisies d'après la polarisation grille) dans leur portion rectiligne (figure 2). Cette droite est la droite d'abscisse à l'origine E (E étant la somme des forces électromotrices des batteries plaque et filament) et de coefficient angulaire $t_g \omega = 1/R_p$. Il faut remarquer d'ailleurs qu'une trop grande valeur de R_p entraîne une augmentation de la batterie plaque, nécessaire pour compenser la chute de potentiel $R_p I_p$ qui a lieu dans cette résistance; la tension plaque effective E_p n'est plus que $E_p = E - R_p I_p$.

Plus important est le rôle de la résistance de grille R_g , et d'une façon plus générale, la manière dont est réalisée l'entrée du montage, c'est-à-dire le choix de R_g et de φ_g . La relation (5) montre que la sensibilité est fonction de:

$$1 + \frac{R_g}{\varphi_g}$$

La valeur de ce rapport que nous comparerons à R_g [que nous avons rencontré dans la relation (2)] montre que:

Si $R_g/\varphi_g > 0$, c'est-à-dire si φ_g a une valeur positive, la sensibilité réelle $S_{int.}$ est inférieure à la valeur $S'_{int.}$ que l'on aurait calculée d'après la relation (2).

Si R_g/φ_g est voisin de zéro, $S_{int.}$ est très voisin de $S'_{int.}$

Si $R_g/\varphi_g < 0$, c'est-à-dire si l'on travaille dans les portions de la caractéristique I_g/E_g qui définissent une résistance de grille négative, on a: $S_{int.} > S'_{int.}$

Si l'on choisit pour φ_g une valeur négative voisine de R_g en valeur absolue, on voit que: $1 + R_g/\varphi_g$ peut devenir très petit. S devient alors très grand et pourrait même théoriquement devenir infini pour $R_g = -\varphi_g$. Mais on aurait en ce point une instabilité qui empêcherait d'utiliser l'appareil. En ajustant le potentiel grille, on peut se placer dans la zone des φ_g négatifs. Beaucoup d'auteurs insistent sur les avantages que donne l'utilisation de telles résistances négatives. Signalons dès maintenant qu'il nous a paru qu'une certaine prudence dans ce sens devait être observée, sauf dans le cas de la méthode de zéro (voir figure 32), ou dans le cas précis où l'on n'impose au potentiel grille que des variations dE_g extrêmement petites. Sinon on s'expose à déplacer le point figuratif: φ_g varie rapidement, l'amplification n'est plus linéaire et α varie suivant la position du spot. D'autre part, l'appareil peut ne pas être très fidèle dans cette zone. En général, en traçant les caractéristiques I_p/E_g de l'ensemble on les voit prendre une pente de plus en plus grande pour peu que R_g ait une valeur élevée: $5.10^8 \omega$ par exemple. Deux tracés de caractéristiques ne donnent pas les mêmes courbes au degré de précision des appareils de mesure utilisés. Enfin, le tracé obtenu en sens inverse (en allant de 0 à — 2

volts, au lieu de — 2 à 0 volts pour E_k) donne des résultats différents.

On pourrait encore envisager l'emploi de grilles en l'air; ce qui conduit à rendre R_g infini et l'on aurait:

$$S_{int.} = P \times \frac{1}{1 + \frac{R_p}{\varphi_p}} \times \varphi_g \times s$$

Comme φ_g peut être grand, $S_{int.}$ devient apparemment très grand. Nous signalerons que l'emploi de grilles en l'air nous a donné des résultats décevants. Une grille n'est en effet jamais complètement libre, à cause des résistances de fuite sur le culot et le socle de la lampe, ou sur le verre de l'ampoule dans le cas des sorties par cornes. Ces résistances de fuite varient de façon discontinue d'un jour à l'autre, d'un instant à l'autre, et amènent des variations brusques dans le courant plaque.

Remarquons de plus qu'une grille en l'air tend immédiatement à se placer au potentiel pour lequel le courant grille est nul; en ce point la résistance φ_g (voir figure 29) peut avoir une valeur positive assez grande et peu avantageuse. Un des cas où ce montage semble indiqué est celui des mesures de faibles différences de potentiel par une méthode de zéro. (Cf. page 79.)

CHAPITRE III

LA COMPENSATION DU COURANT CONSTANT DE PLAQUE CALCUL DE LA SENSIBILITÉ

Les très faibles courants à mesurer, di, amènent de faibles variations du potentiel, donc de très faibles variations dI_p du courant plaque. Par exemple, pour une lampe de pente $P = 1 \text{ mA/V}$ et pour $R_g = 10^8 \omega$, un $di = 10^{-10} \text{ Amp.}$ donnera: $dI_p = 10^{-5} \text{ Amp.}$ représentant la 1/500 partie du courant normal de plaque. Cette variation serait inappréciable sur le milliampèremètre placé habituellement dans le circuit plaque; il faut donc lui substituer un appareil plus sensible: un galvanomètre par exemple.

Il devient nécessaire de compenser le courant constant I_p , qu'un appareil plus sensible ne pourrait supporter. Pour cela, on fait passer dans la portion de circuit où est placé le galvanomètre, un courant antagoniste $I'_p = -I_p$, et le galvanomètre reste au zéro. L'application de di à l'entrée de l'appareil amène un dI_p , que le galvanomètre manifesterá.

Plusieurs méthodes de compensation sont utilisables.

Montages à compensation par une batterie

Une batterie auxiliaire E_c débite dans le galvanomètre, et en sens inverse de I_p , un courant I_c qu'une résistance R_c permet d'ajuster à la valeur convenable (figure 3). Le galvanomètre G , de résistance r_y traversé par un courant i_y , est shunté par une résistance r_s que traverse le courant i_s . Ce sont les accroissements des variables qui nous intéressent. Nous allons établir des relations entre ces accroissements, en écrivant les lois d'Ohm et de Kirchoff

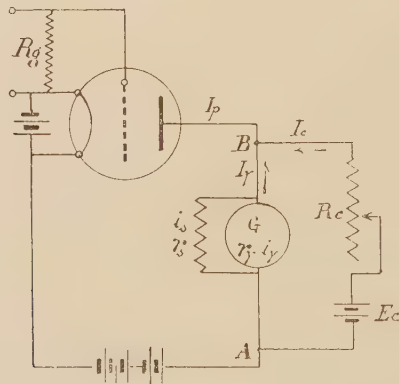


Fig. 3

sous la forme $\sum r. di - \sum de = 0$ pour chaque maille et $\sum di = 0$ pour chaque nœud. Nous ajouterons alors à la forme élémentaire de l'équation de la lampe:

$$\varrho_p dI_p = dE_p + K dE_g$$

les relations:

$$dE_p = -R_y \cdot dI_y \quad (7)$$

$$R_c dI_c - R_y dI_y = 0 \quad (8)$$

$$dI_y + dI_c - dI_p = 0 \quad (9)$$

relations dans lesquelles R_y est la résistance de l'ensemble galvanomètre shunt et I_y le courant total qui va de A en B.

On en déduit:

$$\varrho_p (dI_c + dI_y) = - R_y dI_y + K dE_g$$

Substituant à dI_c la valeur $R_y/R_c dI_y$ déduite de (8) et calculant dI_y/dE_g où nous remplaçons K/ϱ_p par sa valeur P , on obtient:

$$\frac{dI_y}{dE_g} = \frac{P}{1 + \frac{R_y}{R_c} + \frac{R_y}{\varrho_p}} \quad \text{or} \quad \frac{1}{R_y} = \frac{1}{r_s} + \frac{1}{r_y}$$

D'autre part le courant i_y qui passe dans le galvanomètre est lié à I_y par:

$$i_y = I_y \cdot \frac{r_s}{r_s + r_y}$$

Par substitution et après simplification, on a la valeur de di_y/dE_g qui est l'expression intéressante puisqu'elle donne la déviation du galvanomètre en fonction de dE_g :

$$\frac{di_y}{dE_g} = \frac{P}{1 + r_y \left(\frac{1}{r_s} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{\varrho_p} \right)}$$

Or la figure 3 montre que la parenthèse du dénominateur représente l'inverse de la résistance totale sur laquelle est monté le galvanomètre. S'il débite, comme il est de règle, sur sa résistance critique, on a donc:

$$\frac{di_y}{dE_g} = \frac{P}{1 + \frac{r_y}{r_{\text{critique}}}}$$

La sensibilité totale s'écrira alors :

$$S_{int.} = \frac{\delta}{di} = \frac{s \, di_y}{di} = \frac{P}{1 + \frac{r_y}{r_{critique}}} \cdot \frac{R_g}{1 + \frac{R_g}{\varrho_g}} \cdot s \quad (10)$$

Cette sensibilité est d'autant plus grande que le rapport entre la résistance propre du galvanomètre et sa résistance critique est plus petit.

Montages en pont à triodes

Ces montages utilisent deux triodes, dont les résistances filament plaque forment deux branches d'un pont de Wheatstone, les deux autres branches étant formées par des résistances R_1 et R_2 (figure 4).

Une théorie élémentaire peut être présentée rapidement en utilisant les formes différentielles des équations.

Aux équations des lampes, nous ajouterons les relations exprimant les chutes de tension dans les résistances de plaque R_1 , R_2 .

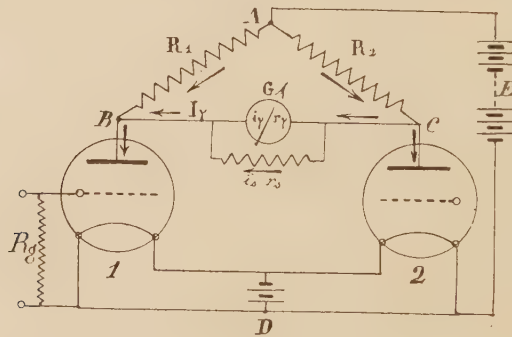


Fig. 4

et la loi d'Ohm pour le circuit A.B.C. On obtient ainsi, en supposant à I_y le sens de la flèche et en gardant les notations du paragraphe précédent:

$$\varrho_{p1} dI_{p1} = dE_{p1} + K_1 dE_{g1} \quad (11)$$

$$dE_{p1} = -(dI_{p1} - dI_y) R_1 \quad (12)$$

$$\varrho_{p2} dI_{p2} = dE_{p2} + K_2 dE_{g2} \quad (13)$$

$$dE_{p2} = -(dI_{p2} + dI_y) R_2 \quad (14)$$

$$R_1 (dI_{p1} - dI_y) - R_y dI_y - R_2 (dI_{p2} + dI_y) = 0 \quad (15)$$

La lampe I étant la lampe d'entrée, le calcul de dI_y en fonction de dE_g conduira à la sensibilité du montage. Pour simplifier les calculs nous poserons:

$$K_1 = K_2 = K$$

$$R_1 = R_2 = R$$

$$\varrho_{p1} = \varrho_{p2} = \varrho_p$$

Il est légitime de faire ces suppositions: en effet, le principal avantage des montages en pont vient de leur symétrie. Pour réaliser cette symétrie, on est pratiquement toujours amené à choisir, parmi certaines lampes d'un même type, deux lampes de caractéristiques aussi voisines que possible. L'expérience montre que si deux lampes absolument identiques ne se rencontrent pas, on trouve, par contre, des lampes pour lesquelles les coefficients d'amplification sont égaux, à une très grande approximation près; pour ces lampes, il en est de même des valeurs de ϱ_{p1} et ϱ_{p2} au point de fonctionnement. On peut d'ailleurs, en polarisant convenablement les grilles, et en agissant sur le chauffage des filaments, arriver à ce résultat. L'équilibre du pont entraînera alors $R_1 = R_2$; il ne passera aucun courant dans le galvanomètre. La possibilité d'avoir un courant nul au galvanomètre résulte de la symétrie du montage, symétrie obtenue assez facilement avec les lampes modernes de bonne marque, dont la fabrication est suffisamment régulière; nous ne pensons pas que cette considération physique évidente ait besoin de démonstration mathématique; l'expérience de deux années a confirmé ce point de vue.

Nous calculerons dI_y/dE_{g1} . Pour cela, nous déduirons

$$dI_{p1} \text{ de (11) et (12)}$$

$$dI_{p2} \text{ de (13) et (14)}$$

en remarquant que pour la lampe 2, le potentiel reste constant: donc $dE_{g2} = 0$. Nous remplacerons dI_{p1} et dI_{p2} par leur valeur dans (15):

$$dI_y \left(\frac{2R^2}{R + \varrho_p} - 2R - R_y \right) + \frac{KK}{R\varrho} dE_{g1} = 0$$

d'où

$$\frac{dI_y}{dE_{g1}} = \frac{\frac{K}{\varrho_p}}{2 + R_y \left(\frac{1}{\varrho_p} + \frac{1}{R} \right)} = \frac{I}{2 + R_y \left(\frac{1}{\varrho_p} + \frac{1}{R} \right)}$$

En remplaçant R_y et dI_y par leur valeur définie par les expressions:

$$\frac{1}{R_y} = \frac{1}{r_y} + \frac{1}{r_s}$$

$$dI_y = di_y \frac{r_s + r_y}{r_s}$$

on déduit:

$$\frac{di_y}{dE_{g1}} = \frac{P}{2 + 2 r_y \left(\frac{1}{2\varrho} + \frac{1}{2R} + \frac{1}{r_s} \right)}$$

Or la parenthèse représente l'inverse de la résistance totale de l'ensemble sur lequel est monté le galvanomètre. Si le galvanomètre travaille, comme cela est indiqué, sur sa résistance critique on aura:

$$\frac{1}{2\varrho} + \frac{1}{2R} + \frac{1}{r_s} = \frac{1}{r_{critique}}$$

et la sensibilité en intensité du montage sera alors:

$$S_{int.} = \frac{P}{2 + 2 \frac{r_y}{r_{critique}}} \cdot \frac{R_g}{1 + \frac{R_g}{\varrho_g}} \cdot s \quad (16)$$

Cette expression comparée à la relation (10) montre que la sensibilité n'est plus que la moitié de ce qu'elle était pour la compensation par batterie.

CHAPITRE IV

LA COMPENSATION DES VARIATIONS DES BATTERIES D'ALIMENTATION POUR LES MONTAGES EN PONT

La sensibilité dans les montages en pont est donc réduite de moitié par rapport à celle des montages ordinaires; mais la question primordiale dans un amplificateur est celle de la stabilité. L'avantage évident des montages en pont est que, par emploi de deux lampes aussi semblables que possible, l'influence de la variation des batteries plaque et filament sur le courant passant dans le galvanomètre G , sera beaucoup plus faible que dans le cas d'une seule lampe. G ne manifestant que les différences entre les variations des courants plaque. Etudions donc les conditions à satisfaire pour que ces variations de tension des batteries d'alimentation soient compensées.

Compensation des variations de la batterie plaque.

En donnant à la batterie plaque une variation de potentiel dE , il en résulte une variation de tension plaque dE_{p1} pour la première lampe, et dE_{p2} pour la seconde. Nous voulons que l'ensemble une fois équilibré, le reste malgré la variation dE . Il faut donc que

$$dE_{p1} = dE_{p2} \quad (17)$$

Ici, les tensions grille sont supposées constantes; la relation (17) entraînera:

$$\varrho_1 dI_{p1} = \varrho_2 dI_{p2} \quad (18)$$

En égalant les seconds membres des équations (12) et (14), où dI_r est nul, on a:

$$R_1 dI_{p1} = R_2 dI_{p2} \quad (19)$$

D'où la condition pour laquelle les variations de la batterie plaque seront compensées:

$$\frac{\varphi_{p2}}{\varphi_{p1}} = \frac{R_2}{R_1} \quad (20)$$

Cette condition est vérifiée dans le cas particulier où nous nous sommes placé pour faire le calcul de la sensibilité.

Compensation des variations de la batterie filament.

Il est possible de chercher la condition pour laquelle il y a compensation de la batterie filament, en introduisant dans l'équation de la lampe, qui donne I_p , un facteur de forme ηE_f , E_f étant la tension filament et $\eta = dI_p/dE_f$, le coefficient d'émission que l'on peut supposer constant dans un petit intervalle. Le calcul, assez compliqué, a été fait par M. Nottingham (17), d'une part, et M. Mac Farlane (39), d'autre part; il conduit à:

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

comme condition de compensation. Nous verrons plus loin comment on peut modifier η_1 et η_2 à l'aide du potentiomètre de M. Wynn Williams. (Cf. page 46.)

Mais nous avons réalisé cette compensation en invoquant une idée nouvelle: les études de M. Nottingham laissent en effet de côté la tension grille; or les fluctuations de cette tension sont plus importantes pour la stabilité que celles du filament. La possibilité de cette compensation est démontrée par le calcul dans la seconde partie de cet exposé, en même temps qu'en est indiquée la réalisation pratique.

Cas des ponts à bigrilles

Les calculs sont semblables à ceux que l'on fait pour les ponts utilisant les lampes à trois électrodes. Il est possible, lorsqu'on

exprime le courant d'émission total I_e , de faire intervenir pour les tubes à trois électrodes la relation:

$$I_e = A (E_g + \frac{1}{K} E_p)^2$$

où A est une constante, et où $K = dE_p/dE_g$, pour une valeur constante de I_e .

On désigne sous le nom de tension de contrôle l'expression :

$$E_g + \frac{1}{K} E_p$$

Dans le cas de bigrilles, on peut définir une tension de contrôle absolument analogue:

$$E_{g \text{ int}} + \frac{E_{g \text{ ext}}}{K_1} + \frac{E_p}{K_1 K_2}$$

On voit qu'une variation de tension dE de la grille interne produit le même effet sur I_e qu'une variation de tension $K_1 dE$ de la grille externe, ou qu'une variation $K_1 K_2 dE$ de la tension d'anode:

$$K_1 = \frac{C_2}{C_3} = \frac{\text{Capacité grille interne}}{\text{capacité grille externe}} \text{ par rapport au filament.}$$

$$K_2 = \frac{C_3}{C_4} = \frac{\text{capacité grille externe}}{\text{capacité anode}} \text{ par rapport au filament.}$$

K_2 est grand en général, car la grille interne est près du filament. $K_1 K_2$ l'est plus encore, ce qui montre bien que la grille interne joue un rôle important et que le rôle de la tension plaque E_p est diminué.

Mais lorsqu'on travaille dans une petite zone autour du point moyen de fonctionnement et sur la partie pratiquement droite

de la caractéristique, on peut substituer à la relation utilisant la puissance $3/2$ une relation linéaire:

$$\varphi_p I_p = E_p + K_2 E_{g \text{ ext}} + K_1 K_2 E_{g \text{ int}}$$

qui conduira, pour sa forme différentielle, et dans le cas de nos montages, à la même relation que dans le cas des triodes, car le potentiel $E_{g \text{ int}}$ est fixe:

$$\varphi_p dI_p = dE_p + K_2 dE_{g \text{ ext}}$$

Le calcul se fait comme précédemment, et donne des résultats analogues.



PARTIE EXPÉRIMENTALE

CHAPITRE PREMIER

MONTAGES NON COMPENSÉS

POUR LES VARIATIONS DES BATTERIES D'ALIMENTATION

Amplificateurs à une lampe

Le premier amplificateur que nous avons construit était un amplificateur à triode, suivant le schéma classique de la figure 1. Il est possible de faire fonctionner cet amplificateur de deux façons: une variation de tension à l'entrée pouvant amener une augmentation ou une diminution du courant plaque. En effet, en polarisant convenablement la grille, on peut se placer, soit à l'extrémité inférieure, soit à l'extrémité supérieure de la partie rectiligne de la caractéristique I_p/E_g . Il suffira, suivant le cas, d'appliquer entre grille et filament un dE_g dans un sens ou dans l'autre, pour obtenir l'augmentation ou la diminution du courant.

Comme à ce moment nous étions déjà en possession de la formule de sensibilité d'un amplificateur (cf. relation 5), notre première tentative fut de rechercher une augmentation de la sensibilité totale par l'emploi de lampes à grande pente. Nous avons tracé ensuite les caractéristiques de l'amplificateur, en faisant varier tous les facteurs, pour chercher leurs valeurs optima. De cette étude nous ne rappellerons que le fait le plus intéressant: lorsque l'on augmente la résistance d'entrée R_g , on voit augmenter la sensibilité totale en courant, mais à partir d'une certaine limite pour R_g , limite assez faible et variable suivant la lampe employée, le pouvoir amplificateur reste stationnaire. Ceci nous a amené à con-

clure qu'il faut attacher au facteur ε_g une importance prépondérante. Par la suite, nous avons pris comme règle d'étudier les caractéristiques I_g/E_g au même titre que les caractéristiques I_p/E_g .

Pour permettre l'emploi d'une résistance d'entrée plus grande, il faut employer une lampe pour laquelle la résistance grille filament est très élevée. Nous savons que c'est le cas des bigrilles. Nous les avons employées suivant le schéma de la figure 5, mais leur pente est insuffisante.

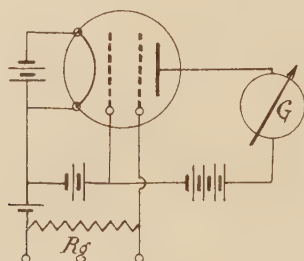


Fig. 5

Amplificateur à deux lampes.

Les qualités demandées aux lampes des amplificateurs précédents ne semblant pas être réunies dans un seul tube, nous avons pensé à réaliser un amplificateur à deux étages, le premier devant avoir un grand coefficient d'amplification en volts, le deuxième une grande pente.

Ce point de vue avait d'ailleurs été mis en évidence par MM. Jouaust et Decaux (47), et nous avons utilisé pour le premier étage le procédé signalé par eux: emploi d'une bigrille dont les deux grilles sont réunies. On obtient ainsi de grandes valeurs du coefficient K . En effet, supposons la grille d'une triode au potentiel E_g et sa plaque au potentiel E_p ; en négligeant la charge d'espace, la quantité d'électricité Q induite sur le filament est:

$$Q = C_g E_g + C_p E_p$$

C_g étant la capacité filament grille

C_p étant la capacité filament plaque

Faisons varier E_g de dE_g , et E_p de $-dE_p$ de façon à ce que Q reste constant; on aura alors:

$$C_g dE_g = C_p dE_p \quad \text{ou} \quad \frac{dE_g}{dE_p} = \frac{C_p}{C_g}$$

$$\text{Or: } K = \frac{dE_p}{dE_g} \quad \text{d'où } K = \frac{C_g}{C_p}$$

K peut donc être rendu aussi grand que l'on veut en diminuant C_p , ou bien en augmentant C_g , c'est-à-dire en rapprochant la grille du filament. Dans le montage ci-dessus, c'est par la réunion des deux grilles, dont l'une est très voisine du filament, que C_g est rendu très grand.

PROBLÈME DE LA LIAISON

Les courants que nous avons à étudier ayant été définis comme ceux pour lesquels le couplage ne pouvait se faire ni par selfs, ni par capacités, le seul moyen envisagé a été la liaison par résistance et contre-batterie: on transforme une variation de courant plaque de la première lampe en une variation de tension, en intercalant une résistance R_{p_2} dans son circuit plaque (voir figure 6). Cette résistance, aux bornes de laquelle se produit une chute de tension de V volts, modifie de $\pm V$ volts suivant le mode de connexion, le potentiel grille de la deuxième lampe. Pour que le potentiel initial de grille de cette deuxième lampe ait une valeur convenable e , valeur déterminée par les caractéristiques, il faudra donc intercaler, entre le point C et la grille de la deuxième lampe, une batterie de tension $V + e$. Cette tension CB_2 est dite tension de « contre batterie de liaison ».

Les valeurs adoptées primitivement pour la résistance de liaison ont été celles que la technique de la T. S. F. conseille habituellement; il est évident qu'il y a intérêt à augmenter cette résistance de liaison, mais il faut alors augmenter également la valeur de la batterie plaque de la lampe, pour maintenir la tension plaque à la valeur choisie. Pour une valeur donnée E de la batterie plaque, la valeur optima de R est fixée comme il a été dit page 17

(figure 2). Désirant que le segment pq ait la valeur la plus élevée possible, il faudra prendre pour ω la plus petite valeur acceptable, sans que pour cela la droite APQ ne cesse de couper les caractéristiques dans leur partie rectiligne.

Nous verrons, au paragraphe suivant, comment ce choix a été fixé pratiquement.

RÉALISATION

Pour le premier étage, nous avons essayé des bigrilles Philips, Mazda et Vatea. Les meilleurs résultats au triple point de vue: possibilité d'interchanger les lampes, constance des résultats, et coefficient d'amplification, nous ont été fournis par des bigrilles Vatea DU 412 (filament à faible consommation). Il suffit d'ailleurs, pour ces lampes, d'une tension plaque inférieure à celle des autres lampes.

Pour le deuxième étage, nous avons employé des lampes à grande pente; deux lampes sont montées en parallèle afin que, pour une même variation de tension grille, la variation du débit final soit plus importante: nous avons en vue en effet l'emploi, comme appareil de lecture, d'un milliampèremètre industriel. Les lampes ont été, soit des Fotos F 10, soit des Mazda DW 702. Les Fotos donnent un débit nettement supérieur et ont une pente plus élevée, mais la régularité de fabrication est en faveur des Mazda.

Dans cet amplificateur, comme dans le précédent, l'emploi comme résistance d'entrée de résistances allant en croissant s'est révélé assez rapidement un moyen inefficace pour augmenter la sensibilité totale. Cependant, comme nous pouvions polariser négativement la grille de la première lampe, — il est en effet possible de se placer sans inconvénients dans la portion incurvée des caractéristiques I_p/E_g —, l'emploi de résistances élevées était permis. Nous avons pu aller jusqu'à $50\ \Omega$ tout en étant certain que R_g restait petit devant ρ_g .

Amplificateur à trois lampes.

L'emploi de résistances de $50\ \Omega$ semble néanmoins ne pas correspondre à une utilisation rationnelle de nos circuits: en effet, les courants que nous cherchons à amplifier (courants photoélec-

triques) peuvent débiter sur une résistance plus élevée: par exemple de l'ordre de 1000 Ω . Dans ces conditions, et pour que R_g reste petit devant ϱ_g , il fallait faire appel à une nouvelle lampe d'entrée. La maison Philips venait à ce moment de lancer sur le marché une triode dite lampe électromètre (4060); c'était la lampe qui paraissait indiquée. Ses caractéristiques sont les suivantes:

Tension de chauffage	0,6 volt
Courant de chauffage	0,7 ampère
Tension plaque	4,0 volts
Pente	0,03 milliampère par volt
Coefficient d'amplification	voisin de 1
Courant inverse de grille	1×10^{-14} ampère.

La liaison entre la lampe électromètre et la grille de la lampe suivante se fait au moyen d'une résistance R_{p1} et d'une contre batterie CB_1 de tension réglable au moyen du potentiomètre M (voir figure 6).

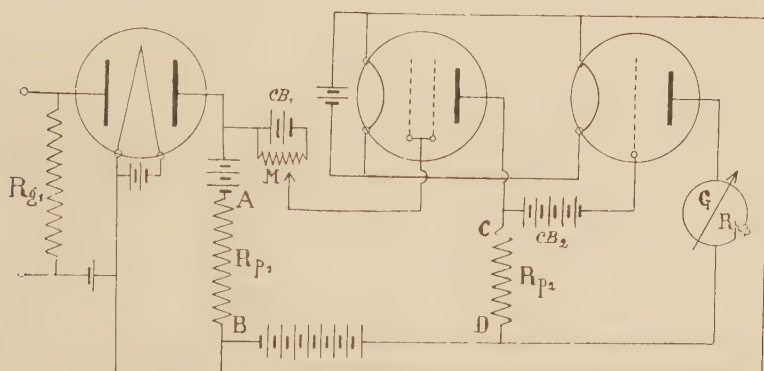


Fig. 6

CALCUL PERMETTANT DE PRÉVOIR LA SENSIBILITÉ DE L'ENSEMBLE DU CIRCUIT

Soit dE_g la différence de potentiel appliquée à la première grille; elle amènera une variation dI_{p1} du courant plaque de cette lampe:

$$dI_{p1} = \frac{K_1 dE_g}{\varrho_{p1} + R_{p1}}$$

R_{p1} étant la résistance de liaison de l'électromètre avec la lampe suivante. Il en résultera une variation dV_{AB} du potentiel, aux bornes AB de la résistance de liaison :

$$dV_{AB} = R_{p1} dI_{p1} = K_1 dE_g \cdot \frac{R_{p1}}{R_{p1} + \varrho_{p1}}$$

C'est cette différence de potentiel qui est appliquée à la grille de la lampe suivante. Un calcul, analogue en tous points, nous donne pour valeur de la variation de potentiel aux bornes CD de la résistance de liaison R_{p2} :

$$dV_{CD} = dV_{AB} \cdot K_2 \frac{R_{p2}}{R_{p2} + \varrho_{p2}} = dE_g K_1 K_2 \frac{R_{p1}}{R_{p1} + \varrho_{p1}} \cdot \frac{R_{p2}}{R_{p2} + \varrho_{p2}}$$

L'application de cette différence de potentiel produit une variation dI du courant de sortie de l'amplificateur, donnée par :

$$dI = dV_{CD} \times P_{effective}$$

La pente effective diffère en effet de la pente statique, relevée sous la tension de fonctionnement par suite de l'introduction d'une résistance R_{p3} dans le circuit plaque (c'est l'instrument de mesure), et d'une résistance R_{g3} dans le circuit grille (c'est la résistance de liaison). On aura donc :

$$dI = dE_g K_1 K_2 \frac{R_{p1}}{R_{p1} + \varrho_{p1}} \cdot \frac{R_{p2}}{R_{p2} + \varrho_{p2}} \cdot P_3 \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_{p3}}{\varrho_{p3}}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_{g3}}{\varrho_{g3}}}$$

En remplaçant dE_g par sa valeur : $R_{g1} \cdot di$, di étant le courant à amplifier, on obtient alors comme valeur du pouvoir amplificateur α :

$$\alpha = \frac{dI}{di} = R_{g1} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \frac{R_{p1}}{R_{p1} + \varrho_{p1}} \cdot \frac{R_{p2}}{R_{p2} + \varrho_{p2}} \cdot P_3 \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_{p3}}{\varrho_{p3}}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_{g3}}{\varrho_{g3}}}$$

De cette expression, il est possible de déduire les valeurs à utiliser pour obtenir les meilleures conditions d'emploi.

Première lampe. — La résistance grille étant très élevée, il est possible de prendre pour R_{g1} une valeur assez grande: 100 à 1000 Ω suivant la valeur désirée du pouvoir amplificateur.

La résistance de liaison R_{p1} a été choisie comme nous l'avons indiqué dans l'étude théorique (voir page 17). Nous prendrons R_{p1} aussi grand que possible, sans être toutefois amené à utiliser une source de tension trop élevée.

Deuxième lampe. — Le coefficient K_1 relatif à la première lampe étant faible, inférieur à l'unité, nous prendrons pour seconde lampe une lampe à K_2 élevé. Nous avons ici encore recours à l'artifice qui consiste à réunir les deux grilles d'une lampe bigrille. On pourrait penser à utiliser une lampe écran, mais il est plus facile d'obtenir les tensions convenables pour les bigrilles que pour les lampes écran. On a un K_2 voisin de 50. La valeur de R_{p2} a été choisie à l'aide des mêmes considérations que pour R_{p1} , en notant ici que la bigrille nécessite une tension plaque qui ne sera qu'une très faible fraction de la batterie d'alimentation.

Troisième lampe. — On choisira naturellement une lampe à grande pente théorique. De telles lampes ont des résistances internes très faibles. Il en résulte que, pour ne pas avoir besoin de tensions trop élevées, la résistance R_{p3} de l'appareil de mesure devra être choisie aussi faible que possible. Nous avons employé un milliampèremètre Carpentier de 0 à 100 ou 0 à 50 mA, dont la résistance des enroulements était 11,62 ω , puis un milliampèremètre Sifam donnant 100 divisions pour 1 mA, sa résistance étant de l'ordre de 80 ω .

En prenant les valeurs numériques suivantes, qui sont celles que nous pouvons employer:

$R_{p1} = 2 \cdot 10^5 \omega$	$R_{p2} = 2 \cdot 10^6 \omega$	$R_{p3} = 50 \omega$
$\rho_{p1} = 4 \cdot 10^4 \omega$	$\rho_{p2} = \text{négligeable devant } R_{p2}$	$\rho_{p3} = 1250 \omega$
$R_{g3} = R_{p2}$	$\rho_{g3} = 10^7 \omega$	
$K_1 = 0,8$	$K_2 = 50$	
$P_3 = 5$		

on trouve comme pente à attendre pour l'ensemble:

$$P = \frac{dI}{dE_g} = 0,8 \cdot 50 \cdot \frac{20}{24} \cdot \frac{2 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^6 + 5} \cdot 5 \cdot \frac{1}{1 + \frac{50}{1250}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot 10^6}{10^7}}$$

$$P = 40 \cdot \frac{5}{6} \cdot 1 \cdot 5 \cdot \frac{125}{130} \cdot 0,8$$

$$P = \parallel = \frac{800}{6} \cdot \frac{125}{130} = \parallel = 130$$

Cette pente n'est qu'une approximation, et en modifiant les valeurs de certains facteurs, on peut atteindre des pentes de l'ordre de 400.

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE L'AMPLIFICATEUR

Nous avons étudié systématiquement, étage par étage, l'amplificateur décrit, en faisant varier tous les facteurs. En traçant des faisceaux de caractéristiques, nous pouvons déterminer la façon dont chacun des facteurs influe sur la pente de l'amplificateur, et reconnaître dans quelles régions ces caractéristiques ont des portions rectilignes.

Nous avons construit, pour obtenir des différences de potentiel, un potentiomètre ainsi constitué : un fil résistant de un mètre de long est tendu sur silice fondue. Tous les 5 cm. (à 1/2 mm. près) est soudée une prise aboutissant, par l'intermédiaire d'un fil de cuivre de longueur constante, à un plot. Une manette permet de faire la prise à n'importe quel plot. L'ensemble manette et plot est isolé lui-même à la silice fondue. En appliquant une différence de potentiel de 2 volts aux extrémités du fil, nous obtenons donc des différences de potentiel de 1/10, 2/10, 3/10 volt, etc... Dans les études qui suivent, le potentiomètre est branché de façon à ce qu'il polarise négativement la grille de la première lampe.

RÉSULTATS

a) Le tracé des caractéristiques de la lampe électromètre nous a montré que l'augmentation de la tension plaque produit un notable accroissement de la pente; mais, dans ces conditions, intervient pour la grille un courant d'ionisation qui peut diminuer la résistance de grille de la lampe. Il n'y a pas d'intérêt, d'autre part, à surchauffer le filament.

b) Quand on étudie l'ensemble électromètre et bigrille, on obtient (figure 7) soit une pente élevée et des caractéristiques incur-

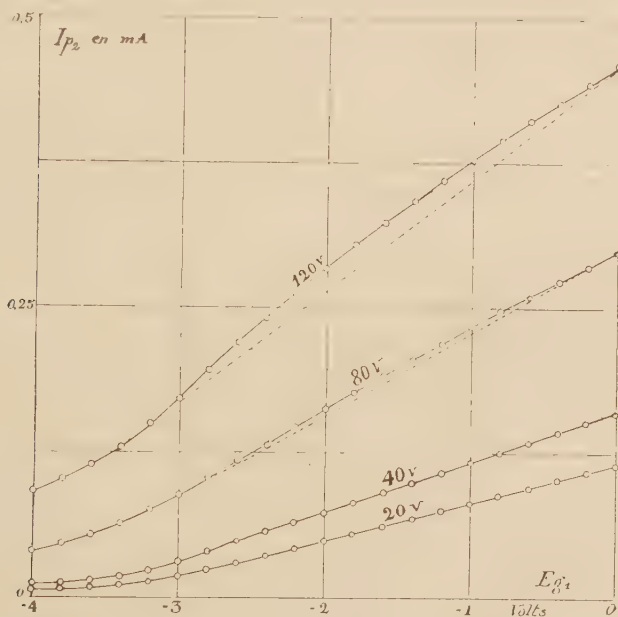


Fig. 7

vées pour 120 volts de tension plaque, soit une pente nettement plus faible, mais des caractéristiques rectilignes sur un grand intervalle de tensions, pour une tension plaque voisine de 20 volts. C'est cette seconde utilisation que nous avons adoptée.

c) Le tracé des caractéristiques de l'ensemble des 3 étages montre, comme il fallait s'y attendre, l'influence prépondérante des tensions grille des deuxième et troisième lampes. La tension grille de la deuxième lampe est commandée par le potentiomètre M et

celle de la troisième par prises variables sur la batterie CB₂. Nous étudierons plus en détail ce dernier facteur.

Tension de contre batterie

La figure 8 donne un faisceau de caractéristiques pour différentes valeurs de la tension de contre batterie, tous les autres fac-

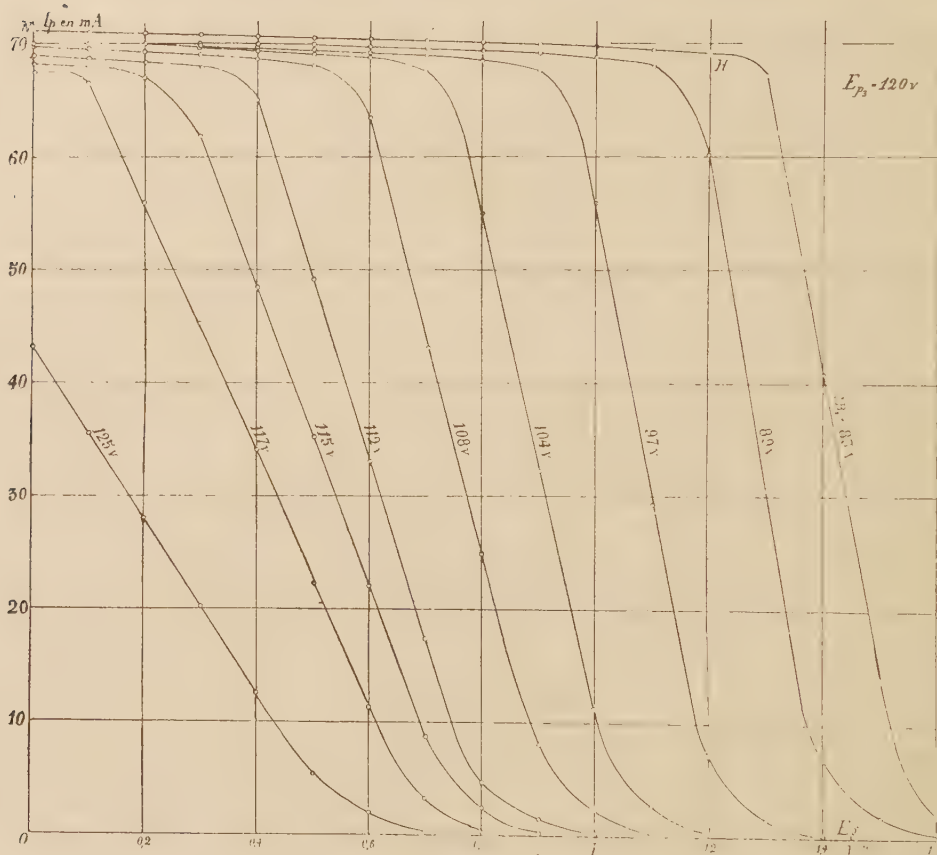


Fig. 8

teurs restant constants. Pour certaines de ces courbes, par exemple pour une valeur de la contre batterie de 83 volts, on observe un palier HN. En intercalant dans le circuit grille des F 10 un microampèremètre, on constate que le courant grille, nul au microampèremètre pour le point H, prend une valeur croissante à me-

sure que l'on se rapproche de N. Donc, tant que le point représentatif de fonctionnement se trouve sur le palier HN, il existe un courant grille notable, ce qui correspond à une mauvaise utilisation des F 10, se traduisant par leur échauffement rapide. Il conviendra d'ajuster la valeur des différents facteurs, de façon à placer toujours le point figuratif au voisinage et en dessous du point H, du moins si l'on veut faire fonctionner l'amplificateur par abaissement du débit plaque.

Le faisceau de caractéristiques de la figure 8 montre de plus qu'il est possible, en agissant simplement sur la tension de contre batterie, de faire varier la pente de l'ensemble de l'amplificateur.

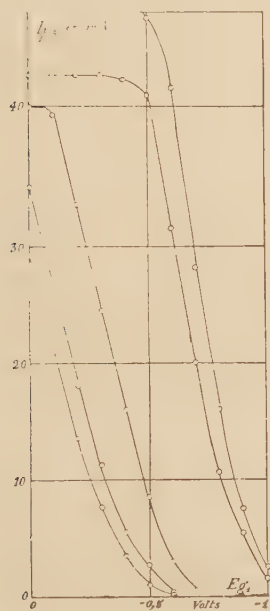


Fig. 9

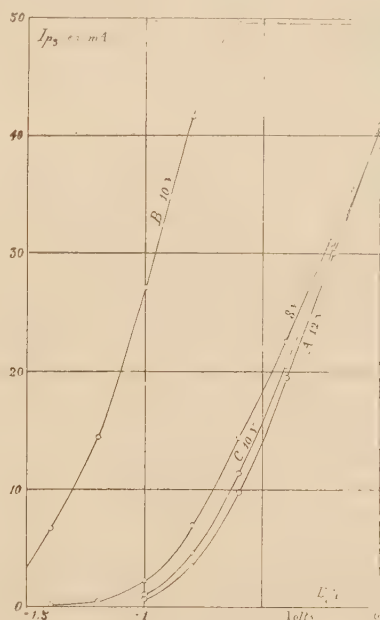


Fig. 10

Autres facteurs

La variation de la contre batterie de liaison CB_1 provoque un effet comparable à celui qu'amène la variation de la contre batterie CB_2 (figure 9).

Si nous supposons que la caractéristique actuelle de l'amplificateur est une courbe A correspondant à un débit initial I, nous obtenons, en faisant varier chacun des facteurs autres que la tension

de contre batterie CB_2 , une courbe B. Cependant, un ajustement de la tension de contre batterie CB_2 permettra d'obtenir le même débit initial I , et nous tombons alors sur une courbe C qui est peu différente de A.

Illustrons par quelques exemples: La courbe A de la figure 10 correspond à une tension plaque de la lampe électromètre de 12 volts. Un abaissement de cette tension à 10 volts fournit la courbe



Fig. 11

B; mais après ajustement de la tension de contre batterie, nous obtenons la courbe C, de même allure que la courbe A, mais de pente moins élevée.

Les figures 11, 12 et 13 montrent chacune les trois courbes A, B, C obtenues dans les mêmes conditions que les courbes de la figure 10, mais par variation des facteurs respectifs suivants: résistance de liaison R_{pl} , tension plaque de la bigrille, tension plaque des F 10. Les mêmes résultats sont fournis par des variations de la tension filament de la lampe électromètre et de la résistance R_{pl} . Les courbes obtenues, étant analogues aux précédentes, ne seront pas données.

Valeurs adoptées pour les différents facteurs

L'expérience montre qu'une augmentation de tension des batteries plaque et filament de la lampe électromètre amène une augmentation de la pente de l'amplificateur. Pratiquement, nous fixons la tension filament à la tension maxima indiquée par le constructeur. Quant à la tension plaque, nous ne voulons l'augmenter outre

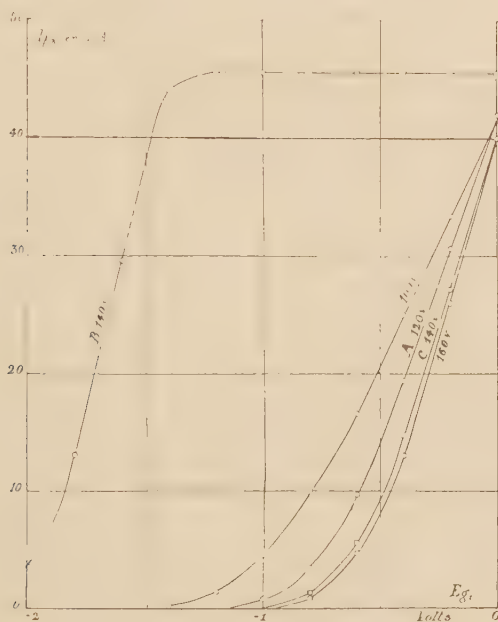


Fig. 12

mesure, car cette augmentation se traduit également par une augmentation des courants d'ionisation.

Les courbes de la figure 11, qui donnent la pente pour différentes valeurs de la résistance de liaison R_{p1} , peuvent étonner au premier abord: il semblerait que la pente doive augmenter avec R_{p1} . Ce serait en effet le cas si l'on maintenait la tension effective de plaque de la lampe électromètre à une valeur constante, ce qui n'a pas lieu ici. D'autre part, abaisser par trop la valeur de R_{p1} serait amener un accroissement des courants d'ionisation par augmentation de la tension plaque effective de l'électromètre triode.

L'augmentation de la tension de la batterie plaque de la bigrille et des F 10 amène, comme on peut s'en rendre compte par les courbes des figures 12 et 13, une augmentation de la pente. Nous avons fixé ces tensions aux valeurs indiquées ci-dessous, pour que l'encombrement des batteries soit acceptable.

Quant à la résistance de liaison R_{p2} , sa valeur la plus convenable s'est révélée être 2Ω .



Fig. 13

Les valeurs adoptées sont:

Tension filament de l'électromètre	0,68 v
Batterie plaque de l'électromètre.....	12 v
Résistance de liaison R_{p1}	200.000 ω
Batterie plaque de la bigrille et des F 10.....	120 v
Résistance de liaison R_{p2}	2 Ω
Tension de contre batterie CB_1 appliquée sur un potentiomètre de 400 ω	4 v
Tension de contre batterie CB_2 , variable par prises.	80 v

En résumé, l'étude expérimentale de l'amplificateur précédent

montre, par le faisceau de caractéristiques de la figure 8, qu'il est possible:

a) D'obtenir une pente qui peut atteindre 260 mA/Volt;

b) De se placer en un point quelconque, choisi d'avance, sur ces caractéristiques et ceci en agissant sur un paramètre que l'on peut le plus souvent choisir à volonté. Les deux paramètres principaux sont les tensions de contre batterie CB_1 et CB_2 , mais l'action des autres n'est nullement négligeable et permettra en particulier d'obtenir de l'appareil le meilleur rendement.

CONCLUSIONS

L'amplificateur précédent s'était révélé comme un montage résistant, robuste, facile à construire, assez peu coûteux et permettant d'atteindre des sensibilités intéressantes; malheureusement sa stabilité n'était pas parfaite. Les courants de sortie pouvaient varier de 0 à 50 mA et même 80 mA pour certaines polarisations, mais l'instrument de mesure employé présentait, autour de sa position d'équilibre, des oscillations de l'ordre de la demi-division; or, l'appareil permettait d'apprécier le dixième de division.

Il était possible de substituer à l'appareil de lecture un instrument plus sensible, en compensant le courant constant des deux dernières lampes au moyen d'un circuit auxiliaire comprenant une force électromotrice (accumulateur) et une résistance, l'ensemble débitant dans l'appareil de mesure un courant égal et de sens contraire au courant plaque. Nous avons substitué ainsi à l'appareil gradué de 0 à 100 mA, un appareil gradué de 0 à 1 mA; mais les oscillations de l'aiguille, de part et d'autre de la position d'équilibre étaient trop considérables pour qu'un tel montage ait une sensibilité pratique qui atteigne le dixième de la sensibilité théorique.

La première idée fut d'attribuer la cause de ces irrégularités au fait que l'on compensait un courant plaque, d'origine électronique, par un courant d'une origine essentiellement différente.

Procédé de compensation par opposition, applicable aux amplificateurs précédents.

Pour les montages précédents, nous avons donc cherché à compenser le courant plaque par un autre courant plaque, circulant en sens inverse dans l'appareil de mesure. Nous avons en effet déjà

réalisé un photomètre à cellules photoélectriques, où un semblable procédé d'annulation de courant, par opposition de deux courants de même origine et d'intensité égale, était employé. La source de ce courant de compensation devait donc être un ensemble identique au dernier étage de l'amplificateur 3 L: d'où le montage de la figure 14. Dans ces conditions, on a pu utiliser comme appareil de zéro un appareil à pivot, sensible à $2 \cdot 10^{-6}$ Amp, dont la stabilité s'est révélée très suffisante. On observait cependant une lente dérive ($5 \cdot 10^{-6}$ Amp en 30 minutes) qui semblait correspondre, avec le groupe de lampes employées, à une diminution du courant plaque.

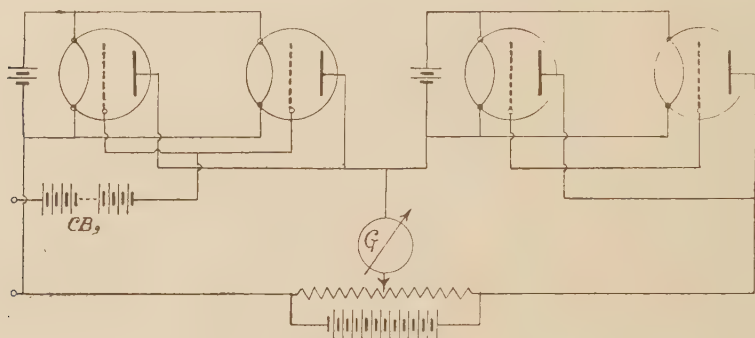


Fig. 14

Le tracé de la famille de caractéristiques, reproduit dans la figure 8, montre qu'il est possible de se placer, pour un intervalle de tension assez grand, dans les parties rectilignes de ces caractéristiques. Le domaine de travail, où l'on peut admettre une relation linéaire entre les dE_g appliqués à la lampe d'entrée et les dI_p mesurés à la sortie de l'amplificateur, peut sembler assez restreint: mais il est suffisant en pratique pour que l'emploi d'un tel amplificateur derrière une cellule photoélectrique permette à celle-ci d'être utilisée dans un large domaine de variation du flux lumineux. Une variation de 0,1 volt du potentiel de grille amène une variation de débit plaque de 10 mA; avec une résistance d'entrée de $10^8 \Omega$, la sensibilité réelle d'un tel montage est de l'ordre de 10^{-13} Amp, donc comparable à la sensibilité d'un bon électromètre.



CHAPITRE II

MONTAGES EN PONT

Montages en pont à triodes

Mais nous avions primitivement l'intention de réaliser des amplifications supérieures à celles précédemment atteintes. Il nous fallait un appareil qui permette, sans grosses difficultés, de mesurer des courants de l'ordre de 10^{-14} Amp.

Devant l'impossibilité d'augmenter la sensibilité de l'ensemble (voir formule 5) par accroissement du facteur pente P , nous avons cherché à augmenter le facteur s , c'est-à-dire à utiliser, comme appareil de mesure, un galvanomètre de laboratoire de sensibilité moyenne (10^{-8} Amp pour 1 millimètre sur une échelle à 1 mètre). Les fluctuations résiduelles de l'amplificateur 3 L semblant incompatibles avec un tel galvanomètre, nous nous sommes alors adressé aux montages en pont qui ont été signalés pour la première fois dans la littérature scientifique par MM. Wynn Williams et Brentano (20, 21 et 22). Des perfectionnements, que nous n'avons connus que beaucoup plus tard, avaient été réalisés en 1929 par MM. Eglin (37 et 38), Razek et Mulder (24, 25 et 26) aux Etats-Unis et M. Mac Farlane (39) en Angleterre, pays où la question de l'amplification des courants continus semble avoir beaucoup retenu l'attention des laboratoires.

Le problème consistait, en utilisant des lampes courantes du commerce, à obtenir un coefficient d'amplification utilisable de l'ordre de 10^6 .

Nous avons déjà réalisé, pour l'utilisation d'une cellule photoélectrique photorésistante Fournier, un montage en pont de Wheatstone dans lequel une seule des branches était remplacée par l'espace filament plaque d'une triode. Ce montage avait donné toute satisfaction, la cellule étant utilisée en « tout ou rien » pour commander un relai.

Quand nous avons voulu faire des mesures à l'aide d'un appareil de lecture sensible, — microampéremètre donnant toute sa déviation pour 0,1 mA —, et en substituant à la cellule Fournier

une cellule photoélectrique sensible, la stabilité du montage n'a pas dépassé celle précédemment atteinte. Il devenait nécessaire et naturel de réaliser un montage en pont dont deux des branches seraient constituées par deux lampes du même type.

Le schéma de principe montre (figure 4), qu'avec des lampes aussi voisines que possible, les fluctuations de la haute et de la basse tension se trouveront à peu près compensées, car le galvanomètre, qui mesure la différence entre les deux courants plaque, est disposé d'une façon symétrique.

M. Wynn Williams a mis le premier en évidence la possibilité de réaliser un équilibre facile du pont en chauffant inégalement les lampes qui peuvent, quelques soient les soins apportés à leur fabrication, ne pas être identiques. Le potentiomètre spécial pour le chauffage des filaments s'est montré, au cours de nos expériences, être un détail particulièrement important et un des facteurs les plus intéressants pour l'équilibre du pont.

Dans le schéma présenté par M. Wynn Williams, la grille est « en l'air »; or les essais faits au laboratoire, et dans lesquels la grille d'une lampe s'est trouvée libre, ont montré dans l'appareil de lecture des fluctuations telles, que depuis longtemps le montage à grille « en l'air » a été évité. Une grille n'est, en effet, jamais complètement isolée: il existe, dans les culots et supports, des résistances de fuite qui sont susceptibles de varier d'un jour à l'autre dans de larges limites.

Le calcul que nous avons exposé précédemment montre que ces résistances de fuite interviennent dans l'expression du facteur d'amplification, et met en évidence le fait que, si la résistance sur laquelle débite la force électromotrice à mesurer n'a pas une valeur constante, le coefficient d'amplification ne sera pas constant lui non plus.

Nous introduisons donc toujours une résistance définie entre le filament et la grille, résistance dont la valeur sera de l'ordre du $1/10$ ou du $1/20$ de la résistance apparente filament grille.

Ces considérations ont conduit à la construction d'un amplificateur à pont semblable à celui signalé par M. Eglin. Mais des fluctuations résiduelles ont persisté: la recherche systématique de ces fluctuations nous a conduit à les rapporter aux variations des accumulateurs basse tension.

Soit, par exemple, une diminution de l'ordre de $1/10$ de sa

valeur pour la basse tension. Elle amènera une diminution du courant plaque qui peut être de l'ordre des fluctuations tolérées, et en même temps une variation de la tension grille qui cette fois retentira de façon notable sur le courant plaque.

Il devient alors nécessaire de compenser les variations des batteries de chauffage du filament, et de polarisation de grille.

La solution de ce problème, qui s'était déjà posé pour la construction d'un amplificateur à une lampe, devenait théoriquement possible. En effet, il suffit de remarquer qu'une diminution dI_f du courant filament produit:

a) Une diminution dI_{p1} du courant plaque dûe à la diminution de chauffage du filament:

$$dI_{p1} = \alpha dI_f$$

α est la pente de la caractéristique I_p/I_f .

b) Une augmentation dI_{p2} du courant plaque dûe à la diminution en valeur absolue du potentiel, habituellement négatif, que l'on applique à la grille:

$$dI_{p2} = \beta dE_g$$

β est la pente de la caractéristique I_p/E_g .

En prenant sur un même potentiomètre l'alimentation du filament et l'alimentation de la grille, nous établissons entre le dI_f et le dE_g une relation constante:

$$dE_g = n \cdot dI_f$$

n est une constante liée à la position des curseurs sur le potentiomètre, à la résistance de ce potentiomètre ainsi qu'à celle du filament.

Nous avons cherché, pour l'électromètre triode Philips 4060 en particulier, s'il existait un point sur les caractéristiques pour lequel les valeurs absolues de βdE_g et αdI_f seraient égales; comme elles sont de sens contraire, on aboutit ainsi à la compensation. Mais nous avons été amené, en procédant de cette façon, à travailler dans des parties de la caractéristique qui ne conduisent pas au meilleur rendement pour l'électromètre triode; le point figuratif est sur une

région descendante de la caractéristique I_v/I_f , et d'autre part, I_f est assez grand (voisin de 1 Amp) pour qu'une batterie d'accumulateurs voie son potentiel diminuer assez rapidement.

La solution réellement pratique a été donnée par M. Mac Farlane. Il suffit d'appliquer ce dispositif aux amplificateurs en pont. La relation:

$$| \alpha \, dI_f | = | \beta \, dE_g |$$

se modifie; en effet, une altération dE_f de la batterie filament amène dans la première lampe une variation de courant plaque:

$$\alpha_1 \, dI_{f1} - \beta_1 \, dE_{g1}$$

et dans la seconde, une variation:

$$\alpha_2 \, dI_{f2} - \beta_2 \, dE_{g2}$$

Pour que le galvanomètre reste au zéro, il faut et il suffit que ces deux quantités soient égales: d'où la condition de compensation:

$$\alpha_1 \, dI_{f1} - \beta_1 \, dE_{g1} = \alpha_2 \, dI_{f2} - \beta_2 \, dE_{g2}$$

dI_{f1} est lié à dE_{g1} , et dI_{f2} à dE_{g2} , comme précédemment: les nouveaux coefficients n_1 et n_2 dépendent de la position des curseurs sur le potentiomètre, de la résistance de ce potentiomètre et de celle des filaments.

La condition précédente peut donc être satisfaite pour un grand nombre de positions des curseurs. En pratique, nous garderons toujours au montage la plus grande symétrie possible.

Nous avons alors essayé un pont à triodes et différents types de lampes: Philips B 424, Tungram P 455, Mazda DW 702 et DY 604, Fotos F 10. Le schéma que nous avons adopté (figure 15), ne diffère de celui de M. Mac Farlane que sur 3 points:

a) Par sa plus grande symétrie: nous introduisons en effet, dans le circuit grille de la seconde lampe, une résistance approximativement égale à celle qui se trouve dans le circuit grille de la première lampe.

b) Par le retour du — de la haute tension fait au + de la basse tension, ce qui augmente la stabilité. La cause de ce phénomène ne nous est pas connue, mais on peut admettre que ce montage diminue la dissymétrie existant dans le filament, par suite de l'inégale répartition du courant plaque dans le circuit du filament.

c) Par le fait que nous polarisons la grille de la deuxième lampe plus négativement que la grille de la lampe d'entrée, ce qui améliore la stabilité pour les lampes que nous avons essayées.

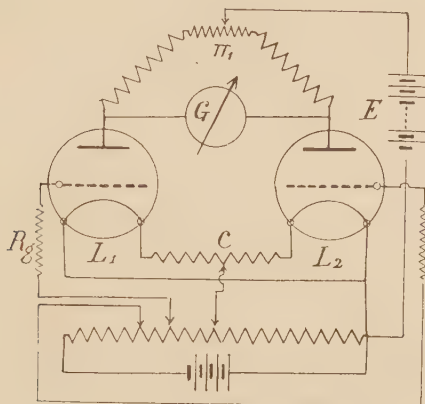


Fig. 15

REALISATION PRATIQUE

Le potentiomètre sur lequel sont prises les tensions des grilles et l'alimentation des filaments, est calculé de façon à ce que le fil résistant ne chauffe pas, car si sa température devenait supérieure à la température ambiante, elle présenterait des fluctuations inégalement réparties le long du fil. Nous avons observé ce phénomène d'une façon très nette sur un premier appareil et enregistré des déviations galvanométriques très grandes dues, par exemple, à l'ouverture d'une porte.

Les résistances introduites dans les circuits plaque et formant les deux autres branches du pont avaient une valeur fixe, choisie entre 5 à 10.000 ohms. Un potentiomètre π_1 de 1000 ohms permettait de répartir la tension sur les deux plaques. La présence de ce potentiomètre (fabrication Giress) à contact glissant, peut

être évidemment une source d'irrégularités, du fait de contacts imparfaits; mais en veillant sur ces contacts, nous sommes arrivé à travailler sans ennui avec ces appareils.

Les résistances introduites dans le circuit grille étaient de $100\ \Omega$; nous avons vérifié d'une part, que pour les lampes employées, les résistances de fuite étaient supérieures à $1.500\ \Omega$, et d'autre part, que d'après le tracé des caractéristiques de grille en charge, la résistance apparente de l'espace filament grille était au moins aussi grande. L'emploi de $100\ \Omega$ était donc justifié.

L'alimentation de la haute tension s'effectuait sous 120 V ; en employant 200 V , le montage était nettement plus sensible, mais la compensation plus difficile à obtenir.

Les supports de lampes étaient en silice fondue, de même que les deux baguettes supportant le fil tendu du potentiomètre d'alimentation. Toutes les autres pièces de l'amplificateur étaient montées également sur silice fondue. Il peut sembler, qu'à certains endroits tout au moins, l'emploi de cet isolant ne s'imposait pas: mais nous disposions de silice en quantité suffisante, et le montage ne s'en trouvait d'ailleurs pas compliqué.

Il faut d'ailleurs remarquer que les isolants commerciaux: ébonite, bakélite, etc... ne présentent pas, au point de vue de l'isolement, les mêmes qualités que les culots de lampes de bonne marque; ils ont une résistance variable dans le temps. Pour l'ébonite cette diminution du pouvoir isolant est sans doute liée à une oxydation du soufre qu'elle contient.

RÉGLAGE DE LA COMPENSATION

Le réglage de la compensation se fait par une méthode d'approximations successives, décrite dans la littérature anglaise sous le nom de « Cut and try ».

On commence par tracer les caractéristiques de la lampe dans les conditions approximatives où elle va être employée, ce qui permet de choisir le point de travail, c'est-à-dire la polarisation de grille qu'il faut appliquer aux lampes.

Ceci fait, les lampes sont montées dans le pont, et les grilles portées au potentiel choisi. On cherche alors, en déplaçant le curseur du potentiomètre π , et le curseur C (voir figure 15), à amener

le spot du galvanomètre au zéro. On diminue alors, de 6 volts par exemple, la tension de la batterie haute tension: soit D_1 la déviation galvanométrique résultante. Après avoir rétabli la tension primitive, on déplace le curseur C dans un sens quelconque; on annule le courant galvanométrique par le curseur π_1 . Reproduisant la diminution de tension de 6 Volts, on observe une nouvelle déviation D_2 . Si $D_2 < D_1$ on continue à déplacer le curseur C dans le sens choisi; si $D_2 > D_1$ on revient en arrière et on déplace C dans l'autre sens.

On arrive très rapidement à une position du curseur C pour laquelle la compensation est complète.

A ce moment, on provoque une chute de tension de 0,2 volt de l'alimentation basse tension. Notant la déviation D'_1 , on revient à la tension primitive; on déplace le curseur G_1 de la grille de la lampe d'entrée dans un sens quelconque et on ramène le spot au zéro en déplaçant le curseur C. Soit D'_2 la nouvelle déviation amenée par la chute de tension de 0,2 volt, que l'on reproduit alors. Si $D'_2 < D'_1$, on continue à déplacer le curseur G_1 dans le même sens, ou bien on revient en arrière et on le déplace en sens inverse si $D'_2 > D'_1$. On obtient ainsi une compensation pour la basse tension.

Les auteurs anglais insistent, et nous avons vérifié l'intérêt de cette recommandation, sur le fait que pendant la compensation de la basse tension, il ne faut pas toucher au curseur du potentiomètre π_1 .

Mais la compensation de la basse tension étant obtenue, on constate que la compensation de la haute tension ne subsiste plus, car on a déplacé le curseur C; mais on en est très près. On retrouvera une compensation haute tension par les mêmes manœuvres que précédemment; la compensation basse tension est alors dérégulée, mais se retrouve très facilement.

Au bout de deux à trois réglages successifs, l'appareil est finalement compensé pour une variation de 6 V de la batterie haute tension et de 0,2 V de la batterie basse tension, ce qui est très suffisant dans les conditions d'emploi.

A noter que, pour un bon réglage, les filaments doivent être chauffés de façon à peu près semblable; l'ensemble se comporte comme un système dont la sensibilité (cf. formule 16) est la moitié seulement de celle d'un amplificateur à une lampe, mais dont la

stabilité permet l'emploi, sans aucune difficulté, d'un galvanomètre sensible à 10^{-8} Amp, le réglage subsistant pendant des temps très longs.

CARACTÉRISTIQUES

Nous donnons trois familles de courbes obtenues avec un amplificateur dont nous avons diminué la sensibilité, pour l'adapter à une cellule photoélectrique à gaz.

a) à tension grille variable pour une tension plaque de 80 v (figure 16) ;

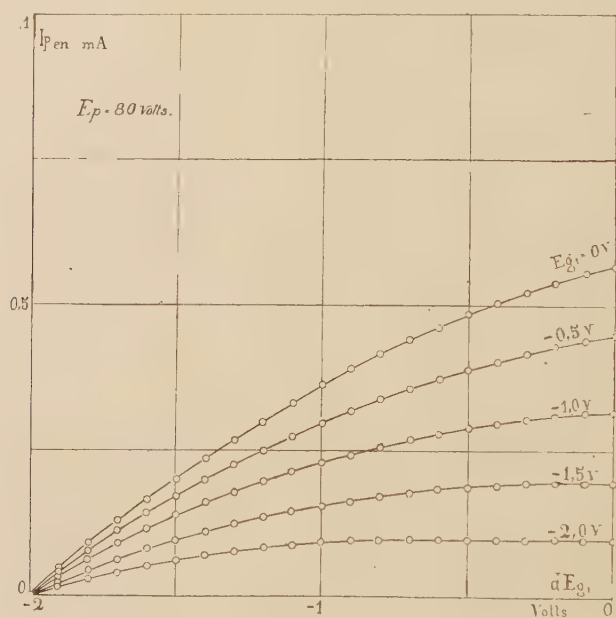


Fig. 16

b) à tension grille variable pour une tension plaque de 120 v (figure 17) ;

c) à tension plaque variable, la tension grille étant fixe à l'origine (figure 18).

Ces caractéristiques ont été relevées en utilisant un montage de sensibilité peu élevée, l'appareil de lecture étant un microampère-mètre. L'aiguille est rigoureusement stable; dans ces conditions il est possible d'apprécier le millivolt aux bornes de la résistance

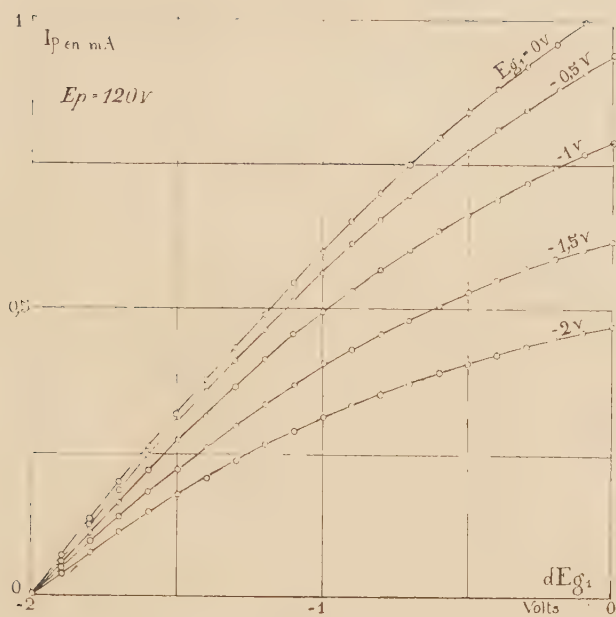


Fig. 17

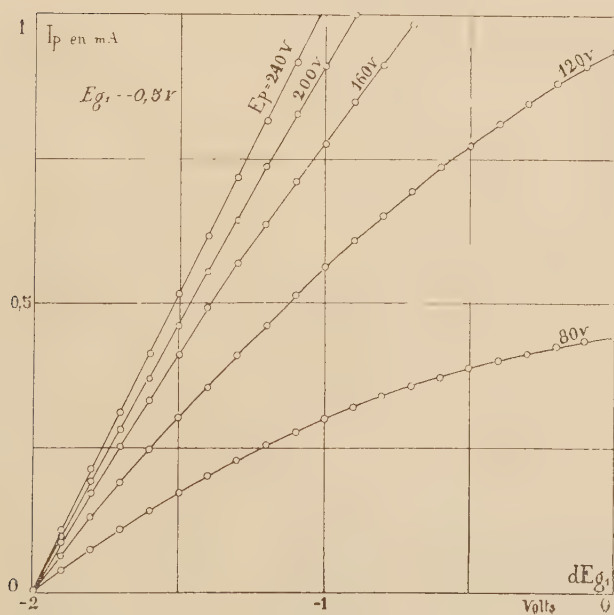


Fig. 18

$R_g = 100 \, \Omega$, ce qui correspond à une sensibilité en courant de 10^{-13} Amp.

CONCLUSIONS

Malgré le soin apporté à sa confection, cet amplificateur, employé avec un galvanomètre sensible à 10^{-9} Amp, a montré une dérive qui pouvait devenir gênante pour des mesures durant un certain temps. Cette dérive est dûe vraisemblablement à des modifications extrêmement lentes qui se produisent dans les lampes. En effet la plaque d'une lampe chauffée par le bombardement électronique qu'elle subit émet sous forme de rayonnement une certaine quantité d'énergie qui peut, en retour, augmenter la température du filament.

Avec les lampes au baryum et au thorium, qui travaillent à des températures relativement basses, ce chauffage en retour atteint une valeur qui est de l'ordre de quelques % de la puissance normale de chauffage, dès que la plaque est à 200° .

Lorsque nous avons tracé les caractéristiques de telles lampes, nous avons constaté que le courant plaque croît pendant un temps extrêmement long, les tensions grille et plaque restant constantes. Le tracé de caractéristiques comparables entre elles nécessite des précautions: ne faire la lecture qu'un certain temps après l'établissement des tensions.

Comme les deux lampes utilisées dans le pont ne peuvent pas être rigoureusement identiques, et le chauffage en retour dans ces deux lampes donnant des effets quelque peu différents, la dérive peut être considérée comme la résultante de ces deux effets de sens contraire.

L'explication que nous proposons s'appuie sur le fait qu'en intervertissant dans notre amplificateur la lampe d'entrée et la lampe compensatrice, la dérive change de sens. D'autre part, on peut également faire changer le sens de la dérive en créant, à l'aide du curseur C, une nette dissymétrie dans le chauffage des filaments, soit en faveur d'une lampe, soit en faveur de l'autre.

Il semble que l'on pourrait conclure à l'existence, pour le curseur C, d'une position pour laquelle la dérive serait pratiquement insensible, mais cela revient à fixer, au début, la position du curseur C; la compensation est alors obtenue plus difficilement: ou

bien elle n'est que très approximative si l'on garde les conditions de bon fonctionnement des lampes, ou bien elle amène le point de travail dans une portion peu intéressante des caractéristiques.

Montages en pont à deux étages

Nous avons envisagé autrement la solution du problème précédent. Nous avons tenu à garder une très bonne compensation en restant dans les portions correctes de la caractéristique. Nous avons construit deux amplificateurs, qui, comme il était à prévoir, présentaient des dérives inégales. Nous les avons montés en cascade, en mettant au premier étage l'amplificateur qui avait la plus faible dérive, et en s'arrangeant de façon à ce que, transmise au second étage, elle se traduise par un déplacement du spot de sens opposé à celui dû à la dérive du deuxième étage.

A ce second étage nous ne demandions pas un pouvoir amplificateur très grand. On pouvait donc se placer dans des conditions telles que la première dérive, multipliée par le pouvoir d'amplification du second étage, fut sensiblement égale à la seconde dérive. Un très léger dérèglage de la tension grille du deuxième étage (première lampe) conduit à une dérive très faible qui n'est plus gênante au bout d'une demi-heure.

CONCLUSIONS

L'ensemble ainsi réalisé avait de bonnes qualités expérimentales. Malheureusement, il était d'une complication un peu trop grande pour être satisfaisant; c'est pourquoi nous avons cherché si d'autres lampes ne permettraient pas de meilleurs montages.

Il convient de remarquer que ce montage, compensé pour les variations lentes des batteries basse tension, ne l'est pas pour les variations brusques qui se produisent fréquemment: en effet, l'inertie calorifique du filament empêche une variation rapide du courant plaque, tandis que la variation de la tension grille rentre immédiatement.

Montages en pont à bigrilles

Comme dans les montages précédents, nous avons voulu pouvoir compenser les variations de batterie plaque et filament, condition nécessaire à la stabilité.

Le montage en pont ayant donné de bons résultats avec les triodes, nous avons cherché s'il était possible d'obtenir mieux en utilisant les bigrilles qui semblaient présenter les avantages suivants:

a) La tension plaque peut en général être réduite dans de très larges proportions sans que la lampe perde de ses qualités. Ceci amène naturellement une ionisation beaucoup moins intense des gaz résiduels et diminue d'autant la portion ionique du courant grille.

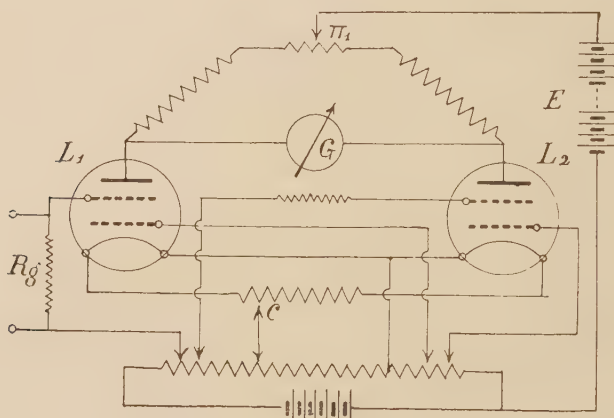


Fig. 19

b) Lorsque l'on a cherché à annuler, en prenant l'alimentation du filament et de la grille d'une triode sur le même potentiomètre, l'influence d'une variation de tension dV_f de la batterie filament sur le courant de plaque, nous avons vu que l'égalité à laquelle on arrivait: $\alpha dI_f = \beta dE_g$ n'était satisfaite que dans des portions difficilement utilisables de la caractéristique.

Pour les bigrilles, il est possible de prendre sur un même potentiomètre la polarisation de la grille de contrôle (-1 à -2 V), la tension filament (4 V) et la tension de polarisation de la grille interne ($+4$ V env.) (figure 19).

L'étude des caractéristiques d'une bigrille, pour un tel montage, montre qu'une diminution dE_f de la tension aux bornes du potentiomètre amène:

a) Une diminution $dI_f = K, \alpha dE_f$ du courant plaque, dûe à

l'abaissement de l'émission électronique du filament. K_1 dépend de la position du curseur sur le potentiomètre et des valeurs des résistances: potentiomètre et filament. α est la pente de la caractéristique I_p/I_f ;

b) Une augmentation $dI_2 = K_2 \beta dE_f$ du courant plaque, due à l'abaissement en valeur absolue de la tension négative de grille externe. K_2 est un facteur analogue à K_1 et β est la pente de la caractéristique, I_p/E_{ge} ;

c) Une diminution $dI_3 = K_3 \gamma dE_f$ due à l'abaissement de la tension grille interne. K_3 est un facteur analogue à K_1 et K_2 , γ est la pente de la caractéristique I_p/E_{gi} .

Il est possible avec une bigrille de satisfaire à l'équation

$$K_1 \alpha + K_3 \gamma = K_2 \beta$$

en demeurant dans des conditions d'utilisation normale. On pourrait donc construire un amplificateur ne comportant qu'une bigrille, et pour lequel la compensation basse tension serait obtenue; mais nous avons préféré monter un amplificateur en pont, afin d'avoir également une compensation haute tension.

RÉALISATION

Nous avons utilisé, comme potentiomètre d'alimentation basse tension, un fil tendu entre baguettes de silice fondue. Le même dispositif a été employé pour le potentiomètre π_1 afin d'éliminer les contacts imparfaits et d'obtenir une variation plus progressive. La compensation ayant lieu séparément pour chaque lampe, il est évident qu'elle sera bien meilleure encore pour le pont.

RÉGLAGE DE LA COMPENSATION

Le réglage se fait à peu près de la même façon que dans le cas du pont à triodes, mais le facteur d'action supplémentaire, représenté par la grille interne de chaque lampe, rend plus facile et plus stable le réglage des compensations.

La compensation haute tension s'obtient, comme précédemment, par l'intermédiaire du potentiomètre π_1 et du curseur C.

Pour compenser la basse tension, on note la déviation D_1 amenée par une diminution de cette tension de 0,4 V, puis on rétablit la tension; on déplace alors le curseur de la grille externe de la lampe compensatrice et on annule le courant galvanométrique à l'aide du curseur de la grille interne de la même lampe. La reproduction de la chute de tension produit une nouvelle déviation D_2 .

Si $D_2 < D_1$, on continue le déplacement du curseur de grille externe dans le même sens, ou bien on revient en arrière et on le déplace en sens inverse si $D_2 > D_1$. Continuer comme dans le cas du pont à triodes.

RÉSULTATS

L'expérience nous a amené à préférer les bigrilles Vatea DU 412 et d'une façon générale les lampes pour lesquelles la prise de la grille auxiliaire se fait sur le côté ou par corne. On peut aussi enlever le culot des lampes et couler du soufre pour maintenir les fils autour du queusot.

Stabilité

L'appareil employé avec un galvanomètre de sensibilité 10^{-8} Amp, et travaillant sur sa résistance critique, ne présente pas d'oscillations brusques dont l'amplitude dépasse 1 mm.

Le galvanomètre donne une déviation de 260 mm. pour 4×10^{-4} volt. L'emploi d'une résistance d'entrée de $10^8 \omega$ que permettent les mesures faites précédemment sur la lampe, conduit à une sensibilité de 10^{-11} Amp. par mm., la règle étant placée à 1 mètre.

La dérive est moins marquée que dans le montage à triodes et ceci se comprend fort bien: la tension appliquée à la plaque étant nettement plus faible dans les bigrilles, la plaque s'échauffera beaucoup moins, le chauffage en retour sera moins marqué. On a pu obtenir une position pour laquelle cette dérive n'atteint pas 1 cm. à l'heure.

Montages en pont avec lampes à chauffage indirect

De nos études antérieures, il résultait que le meilleur des montages essayés était le montage en pont, que le type de lampes le plus satisfaisant était le type bigrille, et que, si l'on cherchait à mettre un galvanomètre extrêmement sensible, de façon à se rapprocher de la sensibilité théorique maxima, on trouvait que la sensibilité utilisable lui était pratiquement bien inférieure. En particulier, avec ces galvanomètres très sensibles, apparaissent des variations du spot, à caractère brusque et irrégulier, que l'on peut rapporter soit à des modifications rapides des potentiels de contact grille-filament, soit à des traces de gaz qui, se déposant sur le filament, modifient son émission. Nous avons déjà souligné par ailleurs l'instabilité qui peut provenir des chauffages en retour et de la dissymétrie amenée dans le filament par le passage du courant plaque.

Il nous a semblé que les lampes à chauffage indirect seraient peut-être mieux adaptées à l'amplification des courants continus.

LAMPES A CHAUFFAGE INDIRECT

Leur mode de construction leur donne les avantages suivants:

a) Une répartition connue et fixée du champ entre la grille et le filament; en effet, la cathode émettrice est une surface équipotentielle de potentiel 0, alors que dans les lampes ordinaires c'est un conducteur pour lequel le potentiel croît et décroît d'une extrémité à l'autre du filament, suivant une loi qui ne nous est pas connue;

b) De par la nature même de la surface émettrice qui est isolée du circuit de chauffage, il n'y aura plus aucun retentissement du courant plaque sur le chauffage filament. En effet, le circuit plaque se ferme directement par le négatif haute tension sans passer par la batterie de chauffage;

c) Les lampes ont une inertie calorifique très élevée (elles mettent plus d'une minute pour atteindre le chauffage normal); par conséquent, les petites fluctuations, inévitables dans la batterie de chauffage, n'affecteront plus l'émission. Comme d'autre part, les accumulateurs ne sont pas reliés à la grille, il n'y aura plus de

sautes du galvanomètre. On pourrait objecter que les accumulateurs qui fournissent les tensions grille peuvent avoir, eux, des sautes; mais le montage à bigrilles, indiqué ci-dessous, élimine cet inconvénient en compensant par la grille externe les variations de tension de la grille interne.

D'autre part, ces lampes sont habituellement recouvertes d'un vernis conducteur que l'on peut mettre au potentiel zéro; ceci évite les mouvements des charges le long des parois de verre de l'ampoule.

Les lampes que nous avons utilisées étaient chauffées sous 20 V. Le montage est conforme au schéma de la figure 20. Nous

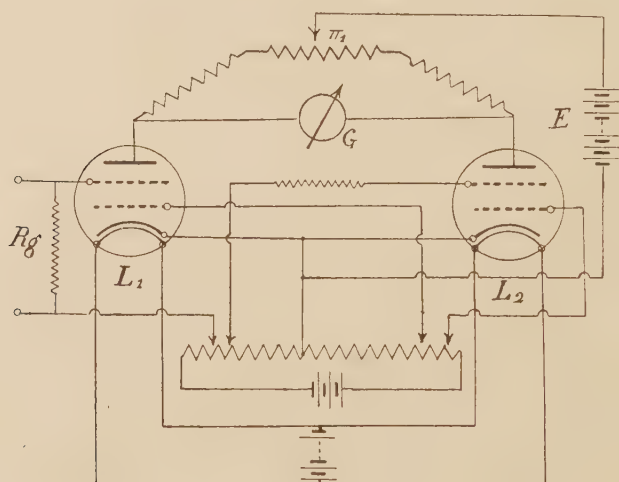


Fig. 20

avons cherché à nous assurer de la similitude des caractéristiques entre deux lampes du même type. Nous avons observé des divergences qui, pour les groupes de lampes étudiées (Philips): triode B 2031, bigrille B 4041 et deux groupes de lampes à grille écran, étaient beaucoup plus marquées que dans les lampes à chauffage direct.

Puis nous avons tracé les caractéristiques I_g/E_g afin d'être certain que l'interposition, dans le circuit grille, de résistances élevées était possible et qu'elle n'altérerait pas trop les caractéristiques normales. De plus, ce tracé nous a fait connaître les potentiels

de grille auxquels il fallait se placer suivant les conditions de travail.

TRIODES

Les courants grille observés ont été de l'ordre de 2×10^{-9} et de 5×10^{-10} Amp, pour une polarisation négative voisine de 2 V. Les tensions grille étaient prises sur un potentiomètre.

La sensibilité du montage a atteint celle des ponts à triodes ordinaires, mais il n'y avait pas ici de compensation des variations de tension de la batterie de grille. Il ne faut donc pas s'étonner

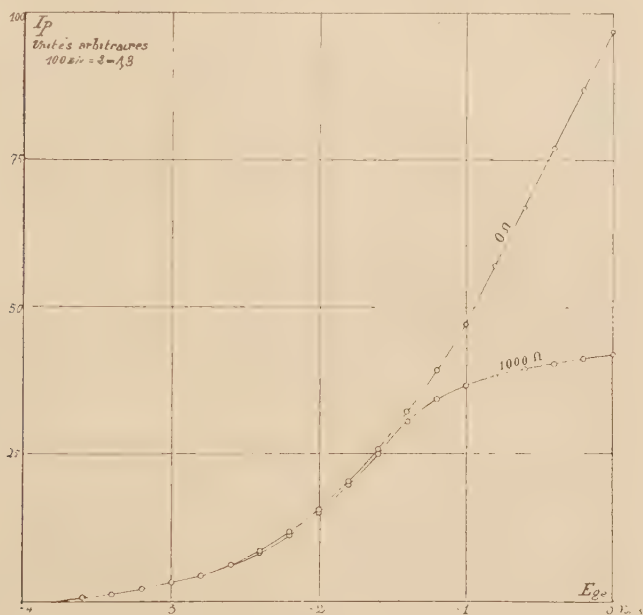


Fig. 21

si les résultats que nous avons obtenus n'ont pas dépassé ceux des triodes ordinaires.

On peut remarquer que le courant de chauffage étant ici hors de cause, il semble justifié, pour expliquer les irrégularités, de les attribuer aux irrégularités de la batterie qui polarise les grilles. Rien que celle-ci ait une grande capacité (60 A.H.).

LAMPES BGRILLES

Nous avons fait une étude plus poussée des ponts à bigrilles, ce type de lampe ayant, comme nous l'avons vu, donné précédemment les meilleurs résultats.

Nous avons constaté que, dans le domaine normal d'utilisation et pour les lampes que nous possédons (Philips B 2041), le tracé

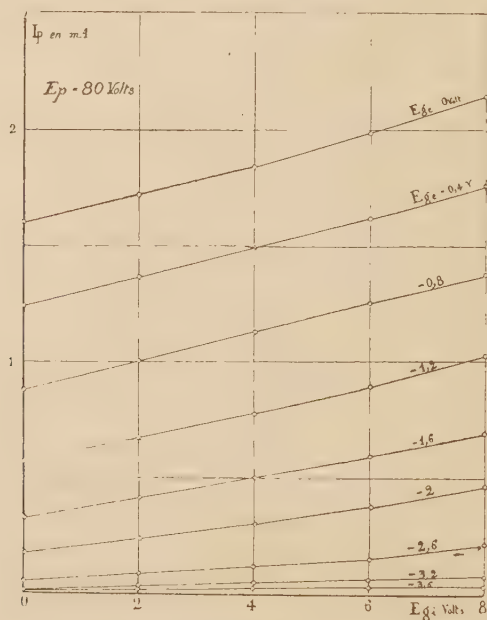


Fig. 22

des caractéristiques de grille n'a pas montré l'existence d'un courant inverse, ce qui a eu lieu au contraire pour toutes les lampes que nous avons essayées précédemment (fig. 21). Il existe un courant électronique normal qui est remarquablement constant dans un intervalle de l'ordre de 1 V. La résistance apparente de l'espace filament grille $r_k = dI_g/dE_g$ est donc, dans cet intervalle, très grande et approximativement constante, ce qui justifie l'emploi de résistances de grille élevées.

Nous avons cherché, d'autre part, à obtenir une compensation totale pour les batteries. La compensation de la batterie plaque

est obtenue, comme pour le montage en pont, par une position du curseur telle que: $R_1/R_2 = \rho_1/\rho_2$.

La compensation de la basse tension a été réalisée en partant de la même idée générale que dans le cas des bigrilles ordinaires: les tensions grille interne et grille externe de chaque lampe sont prises sur le même potentiomètre. Si l'accumulateur, qui alimente ce potentiomètre, subit une variation de tension dEB , il en résulte:

a) Une variation $\alpha.K_1.dEB$, α étant la pente de la caractéristique I_p/E_{g1} ;

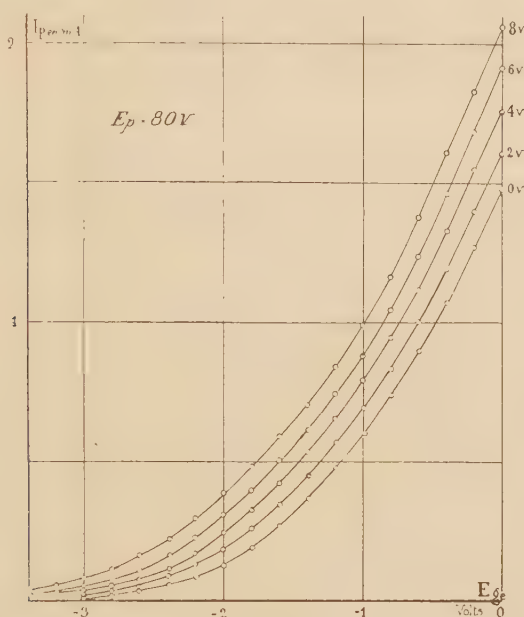


Fig. 23

b) Une variation $\beta.K_2.dEB$ de sens contraire, β étant la pente de la caractéristique I_p/E_{g2} . K et K_1 dépendent des positions des curseurs sur les potentiomètres.

Les figures 22 et 23 donnent le tracé de ces caractéristiques: nous voyons que α varie de 0,07 à 0,02 et que d'autre part β varie de 0,25 à 0,95 mA/V.

En prenant une tension grille interne de l'ordre de 6 à 8 V et une tension grille externe voisine de -1 V, on peut obtenir une compensation complète.

Subsiste la dérive, qui au bout d'une heure devient extrêmement faible. Quant aux oscillations brusques du spot, qui avaient toujours limité l'augmentation de sensibilité des montages précédents, on ne les observe plus avec un galvanomètre sensible à 10^{-9} Amp., débitant sur sa résistance critique.

RÉGLAGE DE LA COMPENSATION

La recherche de la position pour laquelle le montage est compensé se fait de la façon suivante:

I. — *Compensation de la tension plaque*

On fixe le potentiel de grille de la lampe d'entrée, puis à l'aide du potentiomètre π_1 , on amène le spot du galvanomètre au zéro. On diminue la tension plaque de 6 V par exemple; on note la déviation D_1 , puis on revient à la tension primitive. On déplace le curseur de grille de la lampe compensatrice d'une certaine longueur et dans une certaine direction. On ramène le spot au zéro par π_1 . La reproduction de l'abaissement de tension de 6 V, amène une nouvelle déviation D_2 . Si $D_2 < D_1$ on continue le déplacement du curseur de grille dans le sens choisi. Si $D_2 > D_1$ on déplace le curseur en sens inverse.

On arrive ainsi très rapidement à une compensation totale de la tension plaque.

II. — *Compensation basse tension*

Le potentiomètre π_1 et les curseurs des grilles externes des deux lampes ne doivent pas être touchés. Le spot étant au zéro, on produit, en introduisant une résistance auxiliaire un abaissement de la tension aux bornes du potentiomètre π_2 . On observe une déviation D'_1 . On revient à la tension primitive, puis on déplace le curseur de la grille interne de la lampe d'entrée d'une certaine longueur et dans un sens arbitraire. On ramène le spot au zéro en déplaçant dans le sens convenable le curseur de la grille interne de la deuxième lampe. En reproduisant l'abaissement de tension, on observe une déviation D'_2 . Si $D'_2 < D'_1$ on continue dans le même sens; si $D'_2 > D'_1$ on fait les mêmes opérations en sens contraire,

et on arrive finalement à la compensation totale de la basse tension.

III. — Si l'on vérifie à ce moment le réglage de la compensation de la haute tension, on constate qu'il demeure satisfaisant. S'il n'en est pas ainsi, la nouvelle déviation D_1 est extrêmement faible, et l'on arrive très rapidement à un nouveau réglage parfait. La compensation de la basse tension demeure.

Il est commode (figure 24) de tracer les courbes en portant en abscisses le déplacement des curseurs, et en ordonnées les déviations du galvanomètre. Les courbes manifestent immédiatement les positions correspondant à un bon réglage.

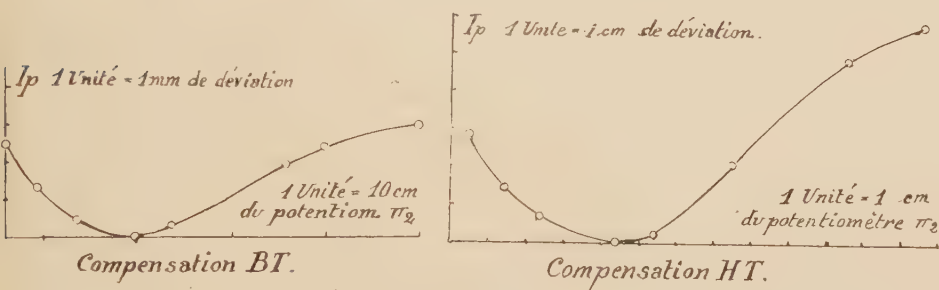


Fig. 24

RÉSULTATS OBTENUS

Nous donnons les caractéristiques obtenues en faisant varier les conditions d'alimentation du pont, celui-ci étant compensé pour chacun des réglages.

La figure 21, qui permet de tracer la courbe I_g/E_g , montre que l'emploi d'une résistance de grille R_g de l'ordre de 1.000Ω est justifié. Néanmoins, les courbes suivantes sont tracées avec une résistance de 300Ω .

Les figures 25, 26, 27 donnent respectivement les caractéristiques I_p/dE_{ge} de l'amplificateur pour des tensions variables: a) de plaque; b) de grille de contrôle; c) de grille de champ. En abscisses sont portées les variations de tension de la grille de contrôle, une unité représentant $1,31 \cdot 10^{-4} \text{ V}$. En ordonnées figurent les déviations du galvanomètre en mm., l'échelle étant placée à un mètre.

La figure 28 montre, pour deux valeurs de la tension grille interne, les résultats obtenus avec un galvanomètre de sensibilité plus grande.

Les tensions sont appliquées par l'intermédiaire d'un potentiomètre et de résistances de l'ordre de $1000\ \Omega$, afin de ne pas abaisser par trop la valeur de R_g , qui se trouve en parallèle.

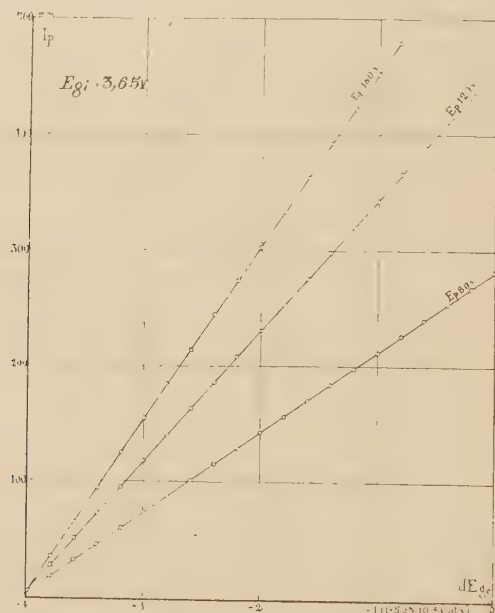


Fig. 25

LAMPES A GRILLE ÉCRAN

Les lampes à grille écran semblaient pouvoir donner un coefficient d'amplification théorique plus élevé que les bigrilles, mais un montage analogue nous a donné un coefficient d'amplification utilisable inférieur, ce que nous avons expliqué par l'absence de compensation dans les tensions grille. L'étude des lampes à grille écran n'a pas été suffisamment poussée, faute de matériel, pour que nous puissions donner une conclusion certaine.



CHAPITRE III

OBSERVATIONS GÉNÉRALES RELATIVES A L'EMPLOI DES AMPLIFICATEURS

Précautions à prendre

BLINDAGE

L'expérience nous a montré, ce qui était facile à prévoir, qu'un blindage rigoureux et complet était nécessaire. Avec les premiers amplificateurs construits, et pour lesquels ces précautions n'avaient

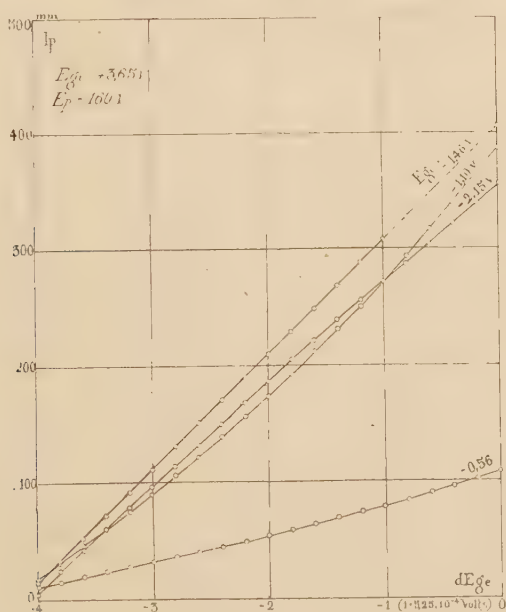


Fig. 26

pas été prises, il se manifestait une instabilité incompatible avec leur emploi.

Nous avons commencé par blinder l'amplificateur lui-même à l'exception des accumulateurs et des fils d'amenée. La stabilité ne fut que légèrement accrue et nous avons été obligé de protéger par un écran métallique toute l'installation, accumulateurs compris, et

d'employer, pour les fils d'amenée à l'amplificateur, un fil commercial entouré, jusqu'au voisinage de ses extrémités, par une gaine métallique.

Cet écran est constitué par une armoire, de forme convenable, entièrement revêtue de feuilles métalliques, les deux étages de cette armoire étant eux mêmes séparés par le même revêtement, mis à la terre.

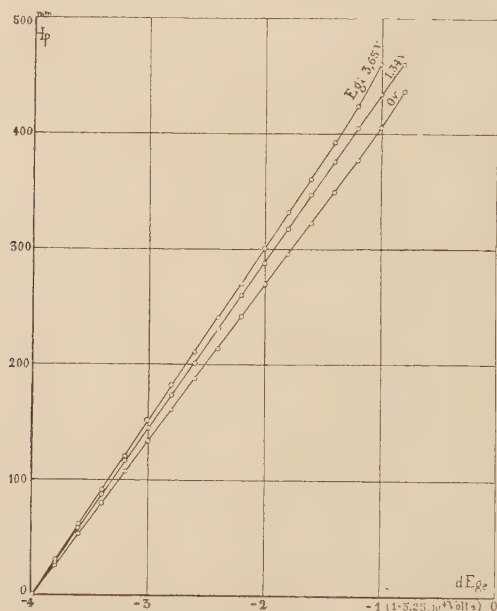


Fig. 27

La nécessité du blindage s'explique par le besoin de protéger surtout la partie du circuit reliée à la première grille contre les influences électrostatiques (approche de l'opérateur) et contre les champs alternatifs, vis-à-vis desquels les fils d'amenée jouent le rôle d'antenne réceptrice, et le montage à résistance, le rôle de détecteur.

Nous avons essayé d'influencer l'appareil en faisant fonctionner des émetteurs à ondes entretenues et à ondes amorties.

Comme il était à prévoir, les premières n'ont pas affecté l'appareil de mesure. Quant aux secondes, leur influence est marquée par l'expérience suivante: une petite bobine d'induction fonctionnant dans le même corps de bâtiment, chacune des sorties du secondaire

étant munie d'une tige de 20 cm. de long, amène dans l'amplificateur 3 L une déviation de tout le cadran de l'appareil de lecture. Le même appareil, enfermé dans l'armoire blindée où seule est ménagée, pour permettre la lecture, une ouverture recouverte d'un grillage métallique, accusait une déviation difficilement perceptible et de l'ordre des fluctuations résiduelles.

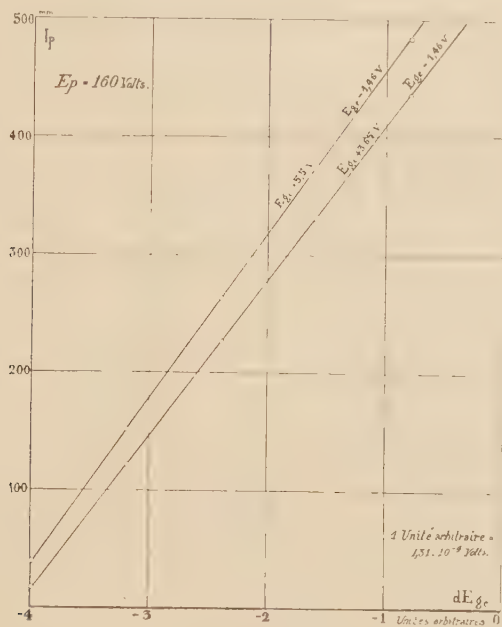


Fig. 28

ISOLEMENT

Dans notre recherche de la stabilité, nous avons remarqué que le remplacement d'un isolant de qualité moyenne par un très bon isolant amenait toujours un progrès. C'est pourquoi, peu de temps après le début de ces recherches, nous avons décidé d'utiliser comme isolant, partout où il serait possible, la silice fondue et polie.

Nous avons en effet perfectionné une méthode pour l'essai des différents isolants (15). Cette méthode, proposée par M. J. Teegan (14), consiste à substituer au galvanomètre du pont de Wheatstone, un amplificateur à courant continu. Le perfectionnement

apporté par nous consiste à compenser le courant constant de plaque par la méthode d'opposition déjà décrite.

Elle nous a permis de mesurer des résistances de l'ordre de $5\ \Omega$, avec une erreur relative maxima qui ne dépassait pas $1/200$. Cette méthode évite l'emploi de tensions élevées dans le pont, tensions qui ont, en effet, l'inconvénient sérieux de faire passer dans les résistances étalons un courant non négligeable, qui peut élever leur température et causer une variation sensible de leur résistance pendant les expériences.

Nous avons essayé la résistance d'échantillons types de différents matériaux utilisés dans la construction de nos amplificateurs:

Le bois qui sert très souvent de support s'est montré un isolant satisfaisant lorsqu'il est très sec.

Les isolants du type bakelite ont été jugés très satisfaisants aussi, mais ils voient leur résistance varier rapidement avec l'état hygrométrique de l'air.

L'ébonite de très bonne qualité (Croix de Lorraine et Jeantet) a donné d'excellents résultats; mais quelle que soit la provenance de l'échantillon, et surtout s'il est « chargé », sa résistance diminue au bout d'un temps assez long. Nous avons déjà émis l'hypothèse suivant laquelle cette variation était liée à l'oxydation possible du soufre servant à la vulcanisation.

Le verre est un isolant désastreux au point de vue qui nous intéresse; sa résistance est extrêmement variable avec la température et les facteurs atmosphériques.

La silice fondue et polie, utilisée sous forme de baguettes, tubes ou plaques, nous a donné d'excellents résultats: la résistance de l'échantillon ne diminuait que très faiblement lorsque l'on saturait de vapeur d'eau l'atmosphère du laboratoire.

Mais il fallait s'assurer que l'isolement entre les broches des lampes était suffisant, pour justifier par ailleurs l'emploi de silice fondue: dans toutes les lampes que nous avons utilisées, soit par la méthode décrite ci-dessus, soit en traçant les caractéristiques de grille, nous avons vérifié que ces résistances étaient de l'ordre de $2 \cdot 10^9\ \Omega$ au minimum (notre montage ne nous permettait pas de dépasser cette valeur dans la mesure des grandes résistances).

Pour les raisons énoncées ci-dessus et à cause de sa commodité d'emploi, nous avons utilisé exclusivement la silice fondue comme

isolant. Il faut toutefois la laver très soigneusement à l'éther et à l'alcool, pour éliminer les poussières et les matières grasses provenant du contact des doigts. L'isolement des accumulateurs a été obtenu en plaçant ceux-ci sur des baguettes de silice.

Remarquons ici que, par cette méthode de mesure des hautes résistances, nous avons pu étalonner les résistances utilisées dans nos circuits de grille. Les traits de graphite sur ébonite ne se sont pas montrés suffisamment stables, pas plus que des traits d'encre de chine sur papier. Mais il est vraisemblable que des résistances ainsi constituées, et placées dans le vide ou en atmosphère très sèche, seraient satisfaisantes. Nous avons trouvé pour les résistances commerciales Alter, des résistances fixes dont la valeur réelle correspondait, avec une surprenante approximation, à la valeur nominale, et qui restaient constantes dans le temps.

Courants grille

Nous avons constamment souligné, au cours de cet exposé, l'importance de la résistance apparente ϱ_g de l'espace filament-grille.

ϱ_g étant défini par:

$$\varrho_g = \frac{dE_g}{dI_g}$$

Le courant dI_g qui permet de définir cette résistance peut avoir plusieurs origines.

ORIGINE ÉLECTRONIQUE

Il existe un courant grille, analogue au courant plaque et dû aux électrons qui se déplacent du filament vers la grille. Même si la grille est à un potentiel faiblement négatif, parmi les électrons qui sortent du filament il en est qui sont animés d'une vitesse initiale suffisante pour atteindre la grille. La loi qui définit la valeur de ce courant est une loi exponentielle.

$$I_g = I_0 e^{-\frac{E_g}{K}}$$

K constante dépendant de la température du filament.

On peut remarquer qu'une diminution de 0,23 volt de la tension grille divisera I_a par 10, ce que l'on observe expérimentalement, la constante K étant peu différente de 0,1.

Il faut noter d'autre part, qu'à cause des modifications qui se produisent dans les lampes au cours de leur fonctionnement et surtout pour le filament, les caractéristiques de ce courant électronique changent dans le temps.

ORIGINE IONIQUE

Quel que soit le procédé essayé pour vider les lampes courantes, elles contiennent toujours des molécules de gaz résiduels. Le choc des électrons sur ces molécules amène une ionisation dès que le champ électrique dû à la grille est assez intense. Cette ionisation augmentera quand le vide sera insuffisant.

Des auteurs américains (24) ont établi une relation entre le courant plaque et le courant ionique de grille. La valeur de ce rapport permet d'ailleurs de définir la qualité du vide de la lampe.

COURANTS DE FUITE

Il existe enfin une autre origine des courants grille: ils sont constitués partiellement par des courants de fuite dûs à l'isolement imparfait entre les électrodes grille-filament et grille-plaque, soit à l'intérieur, soit à l'extérieur de l'ampoule.

Pour les lampes actuelles, et en prenant quelques précautions pour leur utilisation (atmosphère sèche), les résistances de fuite sont de l'ordre de $10^{10} \omega$. Les courants de fuite pourront grossièrement être représentés par:

$$\frac{E_p - E_g}{R_{\text{fuite}}}$$

pour les deux électrodes grille-plaque, et par:

$$\frac{E_g}{R'_{\text{fuite}}}$$

pour les deux électrodes grille-filament; car il n'est pas évident que la loi d'Ohm soit valable pour ces résistances.

Notons enfin que, lorsqu'on emploie une cellule photoélectrique, débitant dans la grande résistance, la tension appliquée à la cellule et à ses connexions peut amener des fuites supplémentaires. Nous avons observé que ces courants prenaient une importance plus grande quand la lampe s'échauffe.

La figure 29 nous donne l'allure du courant grille en fonction du potentiel appliqué à cette grille. Cette courbe est la résultante des trois autres courbes tracées en pointillé. Sa connaissance est particulièrement intéressante, car c'est l'inverse du coefficient angulaire de la tangente en un point donné qui nous fournira la valeur de



Fig. 29

φ_g en ce point. Le problème s'est donc posé de tracer cette courbe, afin de connaître φ_g autour du point de travail; c'est d'ailleurs plutôt l'allure de cette courbe que la valeur numérique exacte de I_g qui importe.

Pour tracer de telles caractéristiques, nous avons employé une méthode qui, si elle n'est pas très précise, donne cependant, avec suffisamment d'exactitude, l'allure de la courbe. Supposons que l'on introduise dans le circuit de grille d'une lampe thermoionique une résistance R_g élevée, et que, dans ces conditions, on trace la caractéristique habituelle donnant I_p en fonction de la polarisation

grille E_g (figure 30). On trouve des courbes qui s'écartent d'autant plus de la caractéristique normale (où $R_g = 0$), que R_g est plus élevée. La pente de ces caractéristiques augmente avec R_g , et l'on voit qu'il y a lieu, dans le cas des amplificateurs à courants continus, de considérer pour chaque lampe plutôt la caractéris-

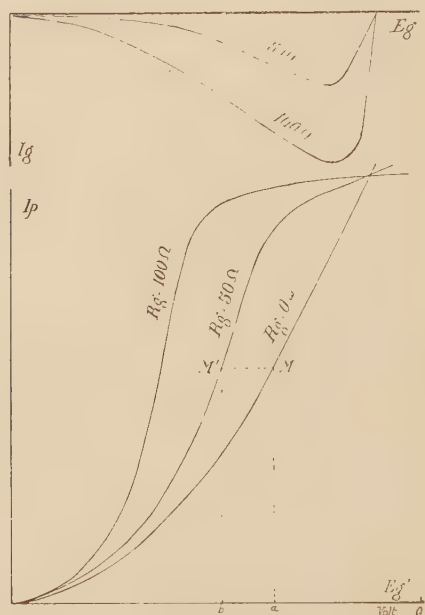


Fig. 30

tique de fonctionnement réel que la caractéristique normale. La pente de la première caractéristique est:

$$P \times \frac{1}{1 + \frac{R_g}{\phi_g}}$$

si celle de la seconde est P.

Nous avons déjà précisé les valeurs possibles du rapport:

$$\frac{1}{1 + \frac{R_g}{\phi_g}}$$

Mais d'autre part, l'interposition de R_g abaisse le potentiel de grille de $R_g \cdot I_g$. En effet, il existe entre la tension de la batterie grille et la tension réellement appliquée E_g la relation:

$$E - E_g = R_g I_g$$

Si l'on considère le point M de la caractéristique normale, (figure 30), l'expérience montre que, pour obtenir la même valeur du courant plaque après l'interposition de la résistance R_g , c'est-à-dire, pour se placer en M', il faut modifier la batterie grille de la valeur a b; la modification à apporter représente la chute de tension $R_g I_g$. Connaissant R_g , on en déduira I_g .

En pratique, nous avons tracé avec soin les caractéristiques normales et les caractéristiques de fonctionnement, en nous plaçant chaque fois dans des conditions semblables à celles qui correspondent à l'emploi pratique.

Nous avons reporté en ordonnées les valeurs telles que MM', et nous avons obtenu les courbes I_g/E_g .

Si l'on voulait faire des mesures précises du courant grille, une autre méthode s'imposerait: mais ici, la méthode graphique nous a paru suffisante.

L'expérience montre que les caractéristiques I_p/E_g , quand on interpose une résistance R_g , coupent toutes la caractéristique normale sensiblement en un même point. En ce point, le courant grille est nul; c'est en ce point qu'il change de sens, et que le courant électronique devient prépondérant.

Les considérations précédentes montrent donc que pour améliorer les types de lampes existantes, en vue de leur utilisation dans l'amplification des courants continus, il fallait chercher à rendre e_g maximum, pour que R_g puisse être très grand. Dans ce but, on a cherché à diminuer les composantes de I_g .

Tout d'abord, on a fait des lampes où l'on atteignait le degré de vide aussi poussé que le permet la technique actuelle. Le nombre des molécules susceptibles d'être ionisées est donc ainsi rendu beaucoup plus faible, mais pour que l'ionisation soit moins intense, il y a intérêt à utiliser des lampes fonctionnant avec une tension plaque réduite; l'emploi des bigrilles était tout indiqué. L'existence de la grille de champ réduit encore les perturbations dues à l'ionisation.

Pour réduire l'influence du courant électronique, on tend à

prendre des lampes dont la partie rectiligne des caractéristiques permet l'emploi de tensions grille nettement négatives.

Enfin, la réduction des courants de fuite a été obtenue en isolant soigneusement l'intérieur de la lampe, et en faisant la sortie de l'électrode grille par une corne située à la partie supérieure de la lampe.

Actuellement, deux lampes semblent surtout spécialement étudiées:

a) La lampe électromètre Philips qui est une triode. Pour soustraire la grille à l'action des ions, cette grille, qui a d'ailleurs la même forme que la plaque, a été placée de l'autre côté du filament par rapport à la plaque, c'est-à-dire en dehors du trajet normal des électrons.

b) La lampe Pliotron F P 54 de la Gécovalve qui appartient au type bigrille; l'isolant intérieur est la silice fondue.

Les coefficients d'amplification de ces deux types de lampes sont très faibles : de l'ordre de l'unité ; leur pente est de l'ordre de $30 \mu\text{A/V}$, et la résistance apparente de grille de l'ordre de 10^{15} à $10^{16} \omega$.

Emploi du galvanomètre

Nous avons vu que la résistance sur laquelle travaillait le galvanomètre était égale à :

$$\frac{1}{2 r_p} + \frac{1}{2 R_p} + \frac{1}{r_s}$$

R_p étant la résistance externe du circuit plaque, r_p la résistance interne de la lampe et r_s la résistance du shunt.

Pour que le galvanomètre soit utilisé dans de bonnes conditions, il est utile que la somme ci-dessus soit égale à $1/R_c$, R_c étant la résistance critique du galvanomètre.

Il sera donc utile, en premier lieu, de déterminer, pour un galvanomètre donné, sa résistance critique; en second lieu, de déterminer, pour les conditions d'emploi, les valeurs de R_p et de r_p d'une manière aussi approchée que possible, pour que le calcul de r_s devienne possible.

De plus, il est bon de pouvoir, en agissant sur le shunt, modifier

la déviation correspondant à un courant donné, condition nécessaire lors du réglage de l'amplificateur. Deux méthodes sont discutées dans un article de M. Nottingham (17) : l'emploi d'un shunt universel et l'emploi d'un shunt d'Ayrton. Ils correspondent aux deux montages de la figure 31. Dans nos mesures nous avons employé, entre autres, deux galvanomètres, l'un de sensibilité 10^{-8} Amp., l'autre de sensibilité 10^{-9} Amp., pour une déviation de 1 mm. sur une échelle à 1 mètre; leur résistance était respectivement de $832 \, \omega$ et $383 \, \omega$, et leurs résistances critiques de $4.200 \, \omega$ et $2700 \, \omega$. Nous avons employé surtout le shunt d'Ayrton, qui est le plus facile à réaliser, compte tenu du fait qu'il peut introduire une erreur dans le rapport des sensibilités. L'autre montage a été

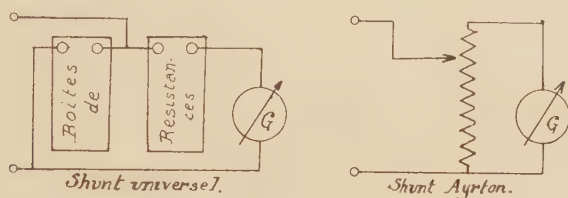


Fig. 31

utilisé avec le dernier amplificateur; il est également très commode.

La formule qui donne la sensibilité conduirait à prendre des galvanomètres extrêmement sensibles en intensité, et les auteurs américains ont effectivement travaillé avec des sensibilités atteignant $5 \cdot 10^{-11}$, mais, outre que le progrès dans cette voie est limité, — M. Ising (10) a montré que la sensibilité d'un galvanomètre ne pouvait dépasser 10^{-12} Amp. à cause des perturbations browniennes —, l'emploi de galvanomètres extrêmement sensibles nous semble se heurter à certaines difficultés. Les perturbations dues aux secousses de toutes origines sont apparentes même avec un appareil de sensibilité 10^{-9} Amp. Ce n'est que dans une cave, contre un des murs principaux de la Faculté, que nous avons pu obtenir un spot rigoureusement fixe. Les galvanomètres ultra sensibles ont, de plus, une très longue période. Ils n'auraient pas été pratiques pour nos mesures: enfin ils n'auraient pas manifesté les perturbations rapides à caractère irrégulier que nous avons observées et que nous avons pu corriger, ces perturbations risquant d'affecter les résultats donnés par un galvanomètre à longue période.

Méthodes d'emploi

MÉTHODE DE DÉVIATION STABLE

On fait passer le courant dans la résistance R_g jusqu'à ce que le spot atteigne une position d'équilibre stable. Il est nécessaire que la résistance R_g et les résistances de fuite gardent une valeur constante.

L'action n'est pas instantanée. Soit i le courant passant dans la résistance R_g , le potentiel de grille s'élèvera de dE_g quand le courant aura passé pendant un temps dt défini par

$$i = C \frac{dE_g}{dt} = \frac{E_g}{R_g}$$

C = capacité du circuit filament grille.

on en déduit la valeur du potentiel de la grille au bout du temps t :

$$E_g = i R_g \left[1 - e^{-\frac{t}{CR_g}} \right]$$

Pratiquement, E_g atteint sa valeur limite en un temps tel que t/CR_g soit de l'ordre de 10; or C est voisin de 10^{-11} farad; R_g voisin de $10^{-9} \omega$ sera donc égal à:

$$t = 10^{-11} \cdot 10^9 \cdot 10 = 1/10 \text{ sec}$$

On voit donc que l'amplificateur construit ci-dessus ne pourrait pas transmettre des courants à fréquence très élevée sans les déformer.

Si l'on voulait, en modulant la lumière sur une cellule photo-électrique d'une façon quelconque, amplifier les courants alternatifs produits, on se heurterait, dans l'emploi des amplificateurs ici décrits, à la difficulté que nous venons de signaler: le circuit d'entrée a toujours une capacité définie, et il n'est pas possible de l'amener à un potentiel E_g plus de i/C E_g fois par seconde.

Si l'on veut employer les appareils décrits plus haut en courant alternatif, il faudra, pour qu'ils soient fidèles, que R_g ait une valeur beaucoup plus faible que celle que nous avons indiquée. On pourrait se laisser guider, pour le choix de R_g , par la considération

que l'amplitude d'oscillation de E_g est inférieure à l'intervalle dans lequel la caractéristique I_p/E_g demeure rectiligne.

Ce temps de $1/10$ de seconde est en général petit devant le temps nécessaire au galvanomètre pour prendre sa position d'équilibre, même si, comme c'est le cas, il débite sur sa résistance critique.

Cependant, dans le cas d'emploi de résistances de l'ordre de $10^{11} \omega$ ou de $10^{12} \omega$, comme l'ont signalé des auteurs américains, ce temps peut atteindre et dépasser 10 secondes.

Lorsque le spot a atteint sa position d'équilibre, la lecture sera d'autant plus précise, et par conséquent l'erreur relative d'autant moindre, que le spot sera plus stable. La qualité de l'amplificateur dépend essentiellement de sa stabilité et la recherche d'amplificateurs stables est en réalité le vrai problème, la sensibilité pouvant être obtenue théoriquement d'une façon assez simple par emploi de plusieurs étages.

Nous soulignerons ce point important en donnant l'exemple suivant: nous avons amené l'amplificateur 3 L et l'amplificateur en pont à bgrilles, chauffage indirect, à donner une même déviation de 20 cm. pour une même différence de potentiel appliquée à l'entrée des montages. Alors que dans le cas de l'amplificateur 3 L la lecture était difficilement faite à 2 cm. près, pour le deuxième amplificateur, la position du spot était repérable à $1/4$ de mm. près. L'erreur relative passe de $1/5$ à $1/400$, et l'on voit comment, avec des sensibilités théoriques voisines, deux appareils peuvent avoir des qualités pratiques complètement différentes.

MÉTHODE DE ZÉRO

L'utilisation de la méthode de zéro est indiquée d'évidente façon par le schéma de la figure 32. A l'aide d'un potentiomètre P on applique à la grille une tension variable produisant une chute de potentiel de sens opposé à la chute $i \times R_g$ dans la résistance de grille, de façon à ce que le galvanomètre soit ramené au zéro.

Cette méthode, avec un potentiomètre du type de ceux employés dans la mesure du pH, permet de s'affranchir de l'étude préalable de la déviation du galvanomètre. En effet, le faible courant à me-

surer sera toujours donné par: $i = E/R_g$, E étant la tension fournie par le potentiomètre.

Mais on peut cependant remarquer que ce montage n'est pas affranchi des variations possibles de la tension E antagoniste, car E est liée d'une façon directe à la tension de la batterie D . Les fluctuations de la batterie D n'étant pas compensées, l'emploi de cette méthode de zéro conduit aux mêmes graves inconvénients que l'emploi de montages non compensés, dès que l'on recherche une grande sensibilité.

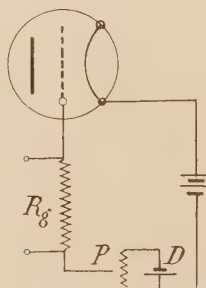


Fig. 32

MÉTHODE DE LA VITESSE DE DÉVIATION

Il existe enfin une méthode de mesure que nous n'avons pas utilisée et qui consiste à observer les variations de la vitesse de déplacement du spot. La lampe, avec la grille en l'air, est réunie à la cellule photoélectrique. Soit i_g le courant grille, C la capacité de circuit grille, la variation du potentiel grille est donnée par:

$$dE_g = \frac{i}{C} \text{ pour } t = 1$$

La variation de dE_g se traduisant par un déplacement du spot qui lui est proportionnel, la mesure de ce déplacement pourra servir à mesurer le courant i . Il est possible de faire des mesures absolues en calculant les éléments du circuit; mais il est préférable d'étalonner l'appareil avec un courant connu. Cette méthode est employée à la « Gécovalve ».

Une variante de cette méthode consiste à appliquer pendant un

temps fixé, t , la tension à l'amplificateur, et à mesurer la déviation correspondante au bout de ce temps t . Ceci revient, dans la relation: $E_g = i \cdot t/C$ à faire soit e constant (première méthode), soit t constant (deuxième méthode).

Remarques générales sur l'utilisation des amplificateurs

AMPLIFICATEURS DESTINÉS A LA MESURE DE FAIBLES COURANTS

Deux cas peuvent se présenter. On envisage: ou bien un courant dont l'amplitude amène une forte variation du potentiel grille, ou bien un courant extrêmement faible amenant un dE_g très petit, l'amplificateur devant rester encore très sensible.

Premier cas. — Il est alors indiqué de placer le point figuratif de la caractéristique I_g/E_g à l'intersection de cette courbe et de l'axe des abscisses: on travaille alors au potentiel que prend la grille lorsqu'elle est isolée, et le courant grille I_g est nul. En faisant varier la résistance R_g , il est possible d'obtenir des sensibilités différentes, et d'adapter l'amplificateur aux besoins d'une expérience. En effet, on a:

$$\frac{\Delta E_g}{\Delta i} = \frac{1}{\frac{1}{R_g} + \frac{1}{\rho_g}}$$

Si nous supposons ρ_g très grand, de l'ordre par exemple de 10^{10} ou $10^{11} \Omega$, $1/\rho_g$ peut être négligé, si R_g est de l'ordre de $10^8 \Omega$. La relation s'écrit alors: $dE_g = R_g \cdot di$, ce qui montre que la variation de R_g permet l'adaptation désirée.

L'amplificateur Rhône-Poulenc est ainsi livré avec un jeu de cinq résistances allant de 10 à 200 Ω . En supposant qu'on veuille mesurer un $di = 10^{-11}$ Amp., nous obtiendrons avec la résistance de 200 Ω un:

$$dE_g = 10^{-11} \cdot 2 \cdot 10^8 = 0,002 \text{ V}$$

que l'appareil peut apprécier. Si l'on avait affaire à un courant de 10^{-7} , on aurait alors:

$$dE_g = 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^8 = 20 \text{ V}$$

que l'appareil ne pourrait supporter sans atteindre des régions où les caractéristiques sont complètement déformées.

Lorsque l'on trace les caractéristiques de l'amplificateur total, on trouve qu'avec 200Ω la sensibilité n'est pas 20 fois plus grande qu'avec 10Ω , ceci, parce qu'un calcul exact doit tenir compte de la valeur de φ_g .

D'autre part, la résistance φ_g qui est l'inverse de la pente de la caractéristique I_g/E_g au point considéré se trouve, pour le potentiel qui correspond à la grille en l'air, avoir une valeur positive assez faible, ce qui limite la valeur possible de R_g . D'autre part, cette valeur de φ_g varie assez rapidement autour du point considéré. Il y a là, entre autres, deux inconvénients à l'emploi du potentiel qui correspond à celui de la grille en l'air.

Deuxième cas. — Les courants à mesurer produisent des dE_g très petits. Dans ce cas, il est préférable de travailler dans des régions où la caractéristique I_p/E_g donne des valeurs négatives pour φ_g . En effet, de la formule de sensibilité (relation 5), on déduit comme nous l'avons déjà souligné, que S_{int} augmente quand φ_g est négatif, et devient très grand quand, dans ces conditions, la valeur absolue de φ_g tend vers celle de R_g . Mais il est plutôt intéressant lorsque, pour faire des mesures, on emploie la méthode de déviation, de se placer dans une région où φ_g varie peu, c'est-à-dire dans la portion à peu près rectiligne de la caractéristique I_g/E_g . Il est également utile que cette zone corresponde à une portion rectiligne de la caractéristique I_p/E_g .

Dans un cas comme dans l'autre, il est nécessaire, avant de faire des mesures, de connaître la sensibilité et la fidélité de l'appareil construit. Nous n'avons pas trouvé de méthode meilleure que celle qui consiste à tracer les caractéristiques donnant, en fonction du potentiel appliqué ou d'un dI connu, la réponse de l'amplificateur. Nous avons donné de telles courbes au cours de cet exposé. Chacune de ces familles a été obtenue plusieurs fois, à des intervalles variant de 15 jours à 6 mois. Nous avons observé de très légères

translations du faisceau des caractéristiques, correspondant sans doute à un vieillissement des lampes.

Les lampes à chauffage indirect ont semblé moins affectées que les lampes ordinaires, mais l'expérimentation sur ces dernières n'a duré que 5 mois.

On pourrait être tenté de penser que si la caractéristique I_n/dE_g est rectiligne, — et c'est ce que nous avons obtenu (figure 28 p. ex.) — il y a proportionnalité entre le courant mesuré et la déviation du galvanomètre. Ceci peut ne pas être toujours exact, car la relation entre le courant i à mesurer et la variation correspondante dE_g du potentiel de grille, n'est du premier degré qu'autant que R_g suit la loi d'Ohm, et surtout que φ_g reste constant.

AMPLIFICATEURS DESTINÉS A LA MESURE DES POTENTIELS

Les amplificateurs étudiés en vue de la mesure des faibles courants, peuvent également servir dans la mesure des potentiels. Les circuits employés n'ont pas à être modifiés, sauf le circuit grille de la lampe d'entrée qui doit être adapté aux conditions de la mesure.

Les directives générales de l'emploi des amplificateurs dans ce but sont les suivantes:

a) Si la résistance de la source de potentiel à mesurer est très grande, I_g doit être très petit, et il est nécessaire de se placer au point de la caractéristique I_g/E_g où I_g est nul. La méthode de zéro est alors indiquée, et l'on en déduit la vraie valeur du potentiel à mesurer.

b) Si la résistance est assez faible, on pourra augmenter la sensibilité de l'appareil en travaillant dans la région des φ_g négatifs. L'emploi de la méthode de déviation est inacceptable tant que l'on n'a pas vérifié la proportionnalité entre les dE_g et les déviations.

COMPLÉMENTS

Pour compléter l'étude de l'amplification des courants continus, nous donnons, dans cette troisième partie, différents montages utilisés par d'autres expérimentateurs.

Montage à bigrille du R. P. Lejay (46)

Dans le but d'obtenir un haut isolement de la grille, condition nécessaire pour les mesures électrométriques que le R. P. Lejay se proposait, l'auteur fait remarquer qu'il suffit, pour isoler la grille de contrôle, de la sortir de la zone parcourue par les électrons, et de la faire agir hors de cette zone. C'est ce que l'auteur a obtenu en utilisant une bigrille et en se servant de la grille de champ comme

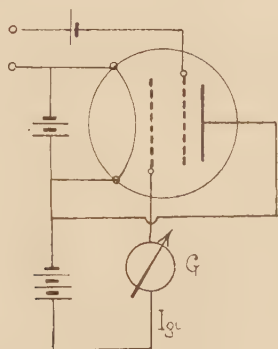


Fig. 33

plaque, la plaque étant reliée à l'extrémité positive du filament (figure 33). Dans ces conditions, on obtient une caractéristique I_{gi}/E_{gc} , qui présente une partie rectiligne à des potentiels E_{gc} pour lesquels le courant plaque I_p est nul. La grille externe est donc bien isolée puisqu'aucun électron ne pénètre dans l'espace compris entre la grille externe et la plaque, et qu'aucune molécule gazeuse ne s'y trouve dissociée.

Ponts à une seule lampe

Il est possible de considérer une lampe soit comme une résistance pure, lorsque la tangente au point de fonctionnement de la caractéristique I_p/E_p passe par l'origine, soit comme une résistance et une force électromotrice en série, dans le cas contraire. La résistance correspondante sera l'inverse de la pente de cette tangente, la valeur de la force électromotrice étant donnée par l'abscisse à l'origine de la tangente.

Une lampe peut donc être intercalée dans une branche d'un pont de Wheatstone, les équations d'équilibre de ce pont tenant compte de l'équivalence ci-dessus. Ces circuits ont été surtout étudiés aux Etats-Unis, où les physiciens disposent du tube déjà signalé: le Pliotron FP 54, qui se prête particulièrement à ce type de montage. La compensation des variations des batteries est assurée en choisissant convenablement les résistances et les potentiomètres d'alimentation.

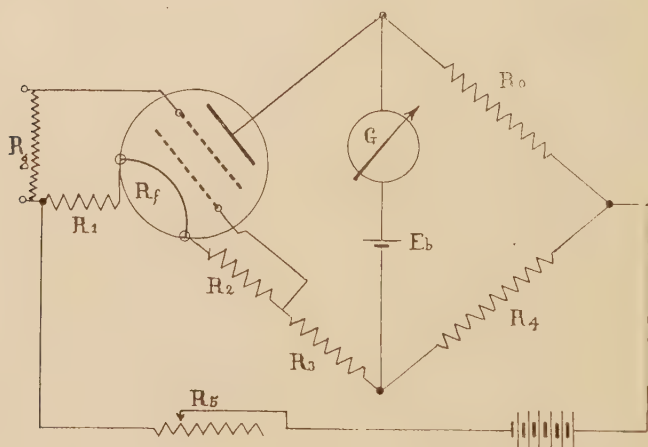


Fig. 34

Montage de M. Soller (31)

M. Soller utilise le fait que l'on peut alimenter le filament et la plaque d'une FP 54 au moyen d'une seule batterie. Le circuit est réalisé ainsi que le montre la figure 34. C'est un montage en pont

de Wheatstone, les 4 résistances du pont étant: r_p , R_0 , R_1 et $(R_2 + R_3 + R_4)$.

La résistance R_1 sert à polariser négativement la grille externe, R_2 sert à polariser positivement la grille interne; R_3 est la résistance d'appoint destinée à équilibrer cette branche du pont. Le rhéostat R_4 permet de faire varier la tension appliquée au pont.

Les équations d'équilibre du pont obligent alors à intercaler dans la diagonale du pont où se trouve le galvanomètre une force électromotrice EB qui, dans le montage de M. Solter, est une pile sèche.

Le montage convient surtout aux lampes dont les caractéristiques I_p/I_f , dans les conditions de fonctionnement, sont des droites, et mieux encore si la pente de ces droites est voisine de 1. La longueur de la portion rectiligne des caractéristiques détermine l'amplitude acceptable des variations de batteries.

MODIFICATIONS DE MM. TURNER ET SIEGELIN (32)

MM. Turner et Siegelin font remarquer que, dans le montage de M. Solter, le galvanomètre se trouve shunté par les deux résistances en série R_0 et R_1 . Or, la somme de ces deux résistances, voisine de 3.000 ω , est insuffisante pour permettre l'emploi d'un galvanomètre très sensible ayant une très grande résistance propre et une résistance critique plus grande encore. Le circuit proposé est celui de la figure 35 où les résistances R_2 , R_3 , R_4 et R_0 n'interviennent plus dans les branches du pont, ce qui permet d'augmenter R_1 et R_0 .

Les auteurs signalent également que, dans le montage de M. Solter, la pile EB augmente la tension plaque de 1,5 V, ce qui fait croître les courants grille d'origine ionique. D'autre part, la force électromotrice de cette pile peut être affectée par des variations de température, et il n'y a pas de compensation pour ces variations.

Dans le montage proposé, il est possible de compenser l'effet de la surtension plaque dû à EB, effet nuisible à la stabilité, en déplaçant le curseur C.

Enfin la force électromotrice EB est obtenue en mettant en opposition des accumulateurs au plomb et des piles sèches, de telle façon que le coefficient de température de l'ensemble soit voisin de zéro.

MODIFICATION DE MM. DU BRIDGE ET H. BROWN (28)

Les deux circuits précédents présentent le gros inconvénient de nécessiter une force électromotrice auxiliaire EB, dont les inévitables variations sont peu ou mal compensées. De plus, ces circuits n'éliminent pas les fluctuations dues à l'émission irrégulière du filament. Quand l'émission du filament change, le courant plaque et le courant grille de champ varient dans le même sens. Il est possible d'équilibrer l'un par l'autre en utilisant le montage de la figure 36. Les quatre branches du pont sont constituées par r_p ,

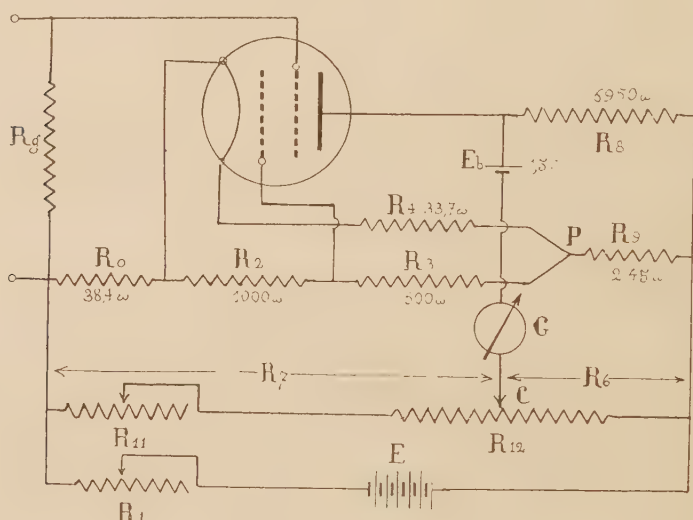


Fig. 35

$(r_{gi} + R_a)$, R_0 et R_b . r_{gi} étant la résistance filament grille interne et r_p la résistance filament plaque de la lampe.

Il faut pour qu'un tel montage soit compensé que:

$$\frac{R_b}{R_0} = \frac{I_p}{E_{gi}}$$

condition pour que le galvanomètre soit au zéro. De plus, pour

qu'il reste au zéro, quelle que soit la valeur de I_f , il faut que $dE/dI_f = 0$, ce qui conduit à

$$\frac{dI_p}{dI_f} = \frac{R_b}{R_o} \frac{dI_{gi}}{dI_f}$$

comme deuxième condition.

Ces conditions seront satisfaites si les courbes I_p/I_f et I_{gi}/I_f sont des droites se coupant sur l'axe des I_f , ce qui est réalisé en pratique avec une approximation satisfaisante. Il est d'ailleurs possible d'ar-

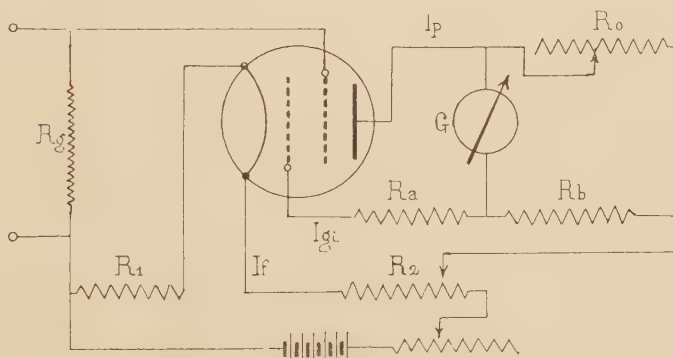


Fig. 36

river expérimentalement à la compensation du pont; le calcul des résistances ne s'impose donc pas. La construction de ces circuits a été rendue plus facile par l'apparition d'un nouveau modèle de Pliotron FP 54. L'auteur donne des courbes de dérive et de fluctuations qui montrent que son circuit est certainement le meilleur des circuits à une lampe qu'on ait proposé.

MONTAGE DE M. L. TURNER (33)

M. Turner fait appel à une méthode nouvelle pour établir un circuit équilibré. Il fait remarquer que la relation $I_p = f(E_p + KE_g)$ qui lie le courant plaque aux tensions appliquées à la plaque et

à la grille est d'habitude linéaire, ce qui entraîne pour e_g une valeur qui reste constante; mais il est des domaines où l'on peut admettre la linéarité de cette fonction. Si cette relation reste applicable quelle que soit sa forme, I_p restera inchangé si, E_p augmentant de dE_p volts, E_g diminue de dE_p/K . C'est ce qui est réalisé par l'ajustement des résistances: le rapport R_2/R_1 est rendu égal à K . On compense ainsi les variations de la tension grille par les variations de la tension plaque.

Cette méthode appliquée dans le schéma de la figure 37 est surtout intéressante dans le cas des lampes à coefficient d'amplification élevé. D'après M. Turner, les courbes de stabilité sont plus aplaties et la compensation est obtenue plus facilement qu'avec les circuits ordinaires; et ceci se comprend, car le domaine où I_p est

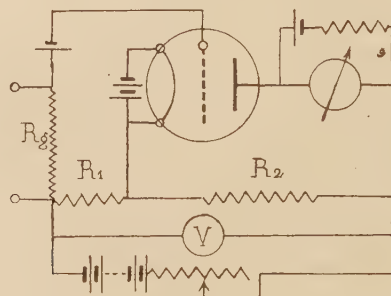


Fig. 37

effectivement fonction de $E_p + KdE_g$ est beaucoup plus étendu que celui où e_p a une valeur constante.

On peut appliquer cette méthode à un montage en pont à deux lampes.

MONTAGE DE MM. MACDONALD ET MACPHERSON (30)

Nous signalerons enfin une méthode, due à MM. Macdonald et Macpherson, pour augmenter la sensibilité des amplificateurs. Elle utilise le fait que le sens de passage du courant grille modifie le potentiel de grille. En mettant en série, d'une part l'espace filament-plaque d'une lampe, et d'autre part l'espace filament-grille d'une autre lampe, il est possible d'obtenir, en se plaçant en un point défini de la caractéristique I_p/E_g de la première lampe, un montage à pente très grande, et qui peut se contrôler comme pour les montages courants.

CONCLUSIONS

1° Dans ce travail, nous avons examiné l'emploi des lampes à plusieurs électrodes du point de vue de l'amplification des courants continus; nous avons souligné l'importance des facteurs résistance de grille et courants de grille, que l'on considère peu dans l'emploi des lampes en courant alternatif.

2° Nous avons donné une méthode de calcul pour étudier les propriétés des différents amplificateurs employés; cette méthode conduit plus rapidement que celles données précédemment à des résultats que nous avons vérifiés.

3° Nous avons construit et étudié une classe d'amplificateurs dont la sensibilité est grande par rapport à leur robustesse, la sensibilité étant toutefois insuffisante pour des mesures délicates.

4° Nous avons construit et étudié une série d'amplificateurs basés sur des principes déjà donnés: pont de Wheatstone réalisé avec des triodes, nous avons eu la possibilité d'éliminer un de leurs défauts, la dérive, en employant des ponts doubles; nous avons signalé des moyens d'augmenter leur stabilité et de faciliter leur compensation.

5° Une théorie de la compensation nous a conduit à établir de nouveaux montages utilisant des lampes bigrilles. L'expérience a vérifié que ces montages en pont avaient une stabilité supérieure à celle des montages à triode; à cette stabilité supérieure correspond une sensibilité accrue. Nous avons donné une méthode de mise au point de ces amplificateurs.

6° Appliquant les mêmes principes aux lampes à chauffage indirect, nous avons mis en évidence l'intérêt qu'offrent les bigrilles de ce type pour la réalisation des amplificateurs à courants continus. Nous avons donné les raisons qui expliquent pourquoi nous avons obtenu de meilleurs résultats.

7° Nous avons indiqué les conditions optima dans lesquelles on doit se placer pour utiliser les amplificateurs, suivant le problème qui est posé: mesure des faibles courants dans de grandes résistances, mesure de différences de potentiel.

8° Enfin nous avons, en quelques pages, donné l'essentiel des travaux étrangers qui résolvent la même question par des méthodes différentes, ceci en vue de faciliter les recherches de ceux que la question pourrait intéresser.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) C. GUTTON. — *La lampe à trois électrodes*, Blanchard, Paris, 1925.
- (2) N.-R. CAMPBELL. — *Photoelectric Cells*, Pitman, Londres, 1929.
- (3) SIMON-SUHRMANN. — *Lichtelektrischen Zellen*, Springer, Berlin, 1932.
- (4) DUNOYER. — *Recueil de Conférences des A.-et-M.*, Hermann, Paris, 1929.
- (5) MORECROFT. — *Electron Tubes*, Chapman, Londres, 1933.
- (6) E. CHAFFEE. — *Theory of thermionic vacuum tubes*, Mac Graw Hill, New-York, 1933.
- (7) BARKHAUSEN. — *Lehrbuch der Elektronen Röhren*, Hirzel, Leipzig 1933.
Tome I: *Principes généraux*. — Tome II: *Les amplificateurs*.
- (8) V. APPLETON. — *Thermionic vacuum tubes*, Methuen, Londres, 1931.
- (9) BEDEAU. — *Cours élémentaire de T. S. F.*, Vuibert, Paris, 1931.

Sur la limite de sensibilité des galvanomètres.

- (10) G. ISING. — *Phil. Mag.* (1926) I, p. 287.
- (11) ZERNIKE. — *Zeit. f. Phys.* (1926) 40, p. 633.

Sur les grandes résistances

- (12) COMPTON et THOMAS. — *Phys. Review* (1925) 28, p. 604.
- (13) N. CAMPBELL. — *Phil. Mag.* (1912) 23, p. 668.
- (14) J.-A.-C. TEEGAN. — *Phil. Mag.* (1931), 12, p. 840.
- (15) P. DONZELOT et J. DIVOUX. — *Bull. Soc. franç. de Phys.* n° 329, (1932), p. 146 S.
- (16) KEITH BREWER. — *R. S. I.* (1930) 1, p. 325.

Sur les amplificateurs.

Nous citerons en tête un article remarquable et complet de

- (17) W.-B. NOTTINGHAM. — *Journal of Franklin Institute* (1930), 209, p. 287.
puis
- (18) WYNN-WILLIAMS. — *Proc. of Camb. phil. Soc.* (1927), 23, p. 810.
- (19) WYNN-WILLIAMS. — *Phil. Mag.* (1928), 6, p. 234.
- (20) J. BRENTANO. — *Nature* (1921), 22, p. 532.
- (21) J. BRENTANO. — *Zeit. für. Physik* (1929), p. 571.
- (22) J. BRENTANO. — *Phil. Mag.* (1929), 7, p. 685.
- (23) J. RAZEK et P. MULDER. — *Phys. Rev.* (1929), 33, p. 284.
- (24) J. RAZEK et P. MULDER. — *J. O. S. A. et R. S. I.* (1929), 18, p. 461.
- (25) J. RAZEK et P. MULDER. — *J. O. S. A. et R. S. I.* (1929), 18, p. 466.
- (26) J. RAZEK et P. MULDER. — *J. O. S. A. et R. S. I.* (1929), 19, p. 402.
- (27) L.-A. du BRIDGE. — *Phys. Rev.* (1931), 37, p. 393.
- (28) L.-A. du BRIDGE et BROWN. — *R. S. I.* (1933), 34, p. 532.

- (29) METCALF et THOMSON. — *Phys. Rev.* (1930), 36, p. 1489.
 - (30) MAC DONALD et MACPHERSON. — *Phil. Mag.* (1933), 15, p. 72.
 - (31) W. SOLLER. — *R. S. I.* (1932), 3, p. 416.
 - (32) L. TURNER et SIEGELIN. — *R. S. I.* (1933), 4, p. 429.
 - (33) L. TURNER. — *R. S. I.* (1933), 4, p. 665.
 - (34) DEARLE et MATHESON. — *R. S. I.* (1930), 1, p. 215.
 - (35) R.-D. BENNETT. — *R. S. I.* (1930), 1, p. 466.
 - (36) NELSON. — *R. S. I.* (1930), 1, p. 281.
 - (37) J. EGLIN. — *J. O. S. A.* et *R. S. I.* (1929), 18, p. 395.
 - (38) J. EGLIN. — *Phys. Rev.* (1929), 33, p. 113.
 - (39) MAC FARLANE. — *Phil. Mag.* (1932), 14, p. 1.
 - (40) HAUSSER, JAEGER et WAHLE. — *Wiss. Ver. der Siemens Konz.* (1922), 2, p. 325.
 - (41) G. du PREL. — *Ann. der Physik* (1933), 70, p. 199.
 - (42) VON ARDENNE. — *Jahr. der drahtlose Tel.* (1927), 29, p. 88.
 - (43) RASMUSSEN. — *Ann. der Physik* (1929), 5 F. 2, p. 357.
 - (44) G. FERRIÉ, R. JOUAUST et R. MESNY. — *C. R.* (1924), 178, p. 1117.
 - (45) P. LEJAY. — *C. R.* (1924), 178, p. 1171.
 - (46) P. LEJAY. — Thèse Sciences, Paris, 1926.
 - (47) R. JOUAUST et B. DECAUX. — *Onde Electrique* (1928), p. 306.
 - (48) LEPRINCE-RINGUET. — *Onde Electrique* (1932), p. 169.
 - (49) J. THOVERT. — *Bull. Soc. franç. phys.* (1928), p. 77 S.
 - (50) J. THOVERT. — *Bull. Soc. franç. phys.* (1931), p. 21 S.
 - (51) G. BRUHAT et P. CHATELAIN. — *Journal de Phys.* (1932), 3, p. 501.
 - (52) G. BRUHAT et A. GUINIER. — *Journal de Phys.* (1933), 4, p. 691.
 - (53) COURTINES et GELOSO. — *Journal de Chim. Phys.* (1930), 27, p. 54.
 - (54) P. DONZELOT. — *Bull. Soc. franç. de Phys.* (1933), p. 785.
 - (55) P. DONZELOT et J. DIVOUX. — *C. R.* (1932), 195, p. 1008.
 - (56) P. DONZELOT et J. DIVOUX. — *C. R.* (1933), 196, p. 1579.
 - (57) P. DONZELOT, E. PIERRET et J. DIVOUX. — *C. R.* (1934), 198, p. 912.
 - (58) P. DONZELOT, E. PIERRET et J. DIVOUX. — *Bull. Soc. franç. de Phys.* (1933), p. 169 S.
 - (59) P. DONZELOT et J. DIVOUX. — *Bull. Soc. franç. de Phys.* (1933), p. 100 S.
 - (60) P. DONZELOT et J. DIVOUX. — *Bull. Soc. franç. de Phys.* (1932), p. 167 S.
-

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
AVANT-PROPOS	7
INTRODUCTION	9

PARTIE THÉORIQUE

Définitions	11
Principe de l'amplification	13
La compensation du courant constant de plaque. — Calcul de la sensibilité	19
La compensation des variations des batteries d'alimentation pour les montages en pont	25

PARTIE EXPERIMENTALE

Montages non compensés pour les variations des batteries d'alimentations	29
Montages en pont	45
Observations générales relatives à l'emploi des amplifications à courant continu	67

COMPLÉMENTS

Compléments	85
CONCLUSIONS	91
BIBLIOGRAPHIE	93

VU ET BON A IMPRIMER:

Nancy, le 11 avril 1934.

Le Doyen,

P. SEYOT.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER:

Nancy, le 11 avril 1934.

*Le Recteur de l'Académie de Nancy,
Président du Conseil de l'Université,*

L. BRUNTZ.

